

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ПО ПРЕКТИРОВАНИЮ,
СТРОИТЕЛЬСТВУ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

На правах рукописи

УДК 624.1.539.3

МИРМУХАММЕДОВ МИРЖАМОЛ МАРУФБОЙ УГЛИ

**Методы диагностики коррозионных повреждений железобетонных
мостов**

Магистерская диссертация

на соискание степени магистра

Специальность 5А340205 – Строительство мостов, тоннелей и
метрополитенов

Научный руководитель:

к.т.н., профессор Ашрабов А. А.

Ташкент - 2017

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ,
СТРОИТЕЛЬСТВУ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

Факультет: “Проектирование и строительство автомобильных дорог и сооружений”.

Кафедра: “Мосты, тоннели и путепроводы”.

Специальность: 5А340205 – “Строительство мостов, тоннелей и метрополитенов”.

Магистрант: Группа 566-15, М. М. Мирмухамедов.

Научный руководитель: д.т.н., проф. А. А. Ашрабов.

Тема: “Методы диагностики коррозионных повреждений железобетонных мостов”.

АННОТАЦИЯ МАГИСТРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы. В единой транспортной системе Узбекистана автодорожный транспорт является ведущим видом транспорта, круглогодично и бесперебойно обеспечивающим транспортные перевозки. При этом немаловажное значение для обеспечения безопасности и бесперебойности движения поездов имеет состояние искусственных сооружений. Мосты – важнейшие, сложные, наиболее ответственные и капиталоемкие сооружения на дорогах. Коррозия арматуры может привести к заметному снижению прочности, и даже к полному разрушению железобетонных мостов. Вопрос коррозии является актуальной проблемой, способствующей в изучении процессов коррозии железобетона, и

определении на этой основе характеристик, необходимых для прогноза долговечности строительных конструкций и расчета надежности.

Цель диссертационной работы. Совершенствование и разработка современных методов технической диагностики и прогнозирования срока службы железобетонных мостов, имеющие повреждения в виде коррозии бетона и арматуры.

Задачи исследований:

1. Проанализировать коррозионные процессы в железобетонных мостах и сооружениях;
2. Изучить методы мониторинга, диагностики и способов антикоррозионной защиты эксплуатируемых мостов и сооружений;
3. С помощью математических моделей сооружения оценивать и прогнозировать влияние различных эксплуатационных, технологических и конструктивных факторов на работоспособность и срока службы сооружения, выявлять причины отказов.

Предмет и объекты исследований. Железобетонные мосты на автомобильных дорогах.

Методология и методы исследований. Математическое моделирование методом строительной механики, численная алгоритмизация с использованием приложений MathCAD.

Научная новизна работы результатов исследований. Совершенствованы и разработаны современные методы технической диагностики и прогнозирования срока службы железобетонных мостов, имеющих повреждения в виде коррозии бетона и арматуры.

Практическая ценность результатов исследований. Разработанная методика позволяет оценить срока службы железобетонных конструкций мостов имеющих повреждения в виде коррозии бетона и арматуры.

Основные результаты выполненных работ. Разработаны критерии технического диагностирования и методов прогнозирования срока службы железобетонных мостов.

Краткая формулировка заключений и рекомендаций. Полученные в работе результаты и выводы показывает необходимость создания обоснованных с математической точки зрения новых методик расчета прогнозирования срока службы железобетонных мостов. При этом одним из наилучших методов для диагностики коррозионных повреждений является ультразвуковые, вибрационные и магнитно-индукционный методы. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, строительстве и эксплуатации автодорожных железобетонных мостов.

Научный руководитель: _____ д.т.н., проф. А. А. Ашрабов

Магистрант: _____ М. М. Мирмухаммедов

**REPUBLIC OF UZBEKISTAN MINISTRY OF HIGHER AND
SECONDARY SPECIAL EDUCATION**

**TASHKENT INSTITUTE OF DESIGN, CONSTRUCTION AND
MAINTENANCE OF AUTOMOTIVE ROADS**

Faculty: “Design a construction of automotive roads and facilities”

Chair: “Bridges, tunnels and overpasses”

Specialty: 5A340205 – “Construction b ridges, tunnels and undergrounds”

Master student: Group 566-15, M.M. Mirmukhammedov.

Scientific supervisor: prof. A. A. Ashrabov.

Subject: “The methods for diagnostics of corrosion damage of reinforced concrete bridges”.

ABSTRACT FOR THE MASTER DISSERTATION

Relevance of the topic. In the unified transport system of Uzbekistan, road transport is the leading mode of transport, which provides transportation all the year round and is uninterrupted. At the same time, the state of artificial structures plays an important role in ensuring the safety and uninterrupted operation of trains. Bridges are the most important, complex, most responsible and capital-intensive structures on the roads. The problem of corrosion is an actual problem, which contributes to the study of the processes of corrosion of reinforced concrete, and

determining on this basis the characteristics necessary for the prediction of the durability of building structures and the calculation of reliability.

The aim of thesis and missions. Improvement and development of modern methods of technical diagnostics and forecasting of service life of reinforced concrete bridges, which have damage in the form of corrosion of concrete and reinforcement.

Objectives of the study.

1. Analyzing the corrosion processes in reinforced concrete bridges and structures;
2. To study methods of monitoring, diagnostics and methods of corrosion protection of operated bridges and structures;
3. Using mathematical models of the structure to evaluate and predict the impact of various operational, technological and structural factors on the operability and service life of the structure, to identify the causes of failures.

Subject and object of the research. The reinforced bridges on highways.

Research methods and techniques. Mathematical modeling by method of structural mechanics, numerical algorithmization using MathCAD's applications.

Degree of innovation of the results of research from a scientific point of view. Modern methods of technical diagnostics and forecasting of service life of reinforced concrete bridges damaged in the form of corrosion of concrete and reinforcement have been improved and developed.

Implementation and practical significance of the study. The developed technique allows to estimate the service life of reinforced concrete structures of bridges having damages in the form of corrosion of concrete and reinforcement.

The major results of the work performed. The criteria for technical diagnosis and methods for predicting the service life of reinforced concrete bridges have been developed.

An overview of output and demand. The results and conclusions obtained in the work show the necessity of creating new methods of calculating the life expectancy of reinforced concrete bridges from a mathematical point of view. One of the best methods for diagnosing corrosion damage is ultrasonic, vibration and magnetic-induction methods. The obtained results can be used in the design, construction and operation of road ferro-concrete bridges.

Scientific supervisor: _____ prof. A. A. Ashrabov

Master student: _____ M. M. Mirmukhammedov

Оглавление

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 8 |
| Глава I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА | 12 |
| I.1. Коррозионные процессы в железобетонных мостах и сооружениях... | 12 |
| I.2. Мониторинг, диагностика антикоррозионная защита эксплуатируемых мостов и сооружений,..... | 24 |
| I.3. Методы оценки надежности и долговечности мостовых железобетонных конструкций | 31 |
| I.4. Выводы по главе I..... | 37 |
| Глава II. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ КОРРОЗИОННЫХ ДЕФЕКТОВ | 39 |
| II.1. Совершенствование методики технической диагностики железобетонных конструкций мостов | 39 |
| II.2. Технология и концепция механизированного ремонта конструкций..... | 49 |
| II.3. Приборы и аппаратуры для диагностики скрытых дефектов и повреждений железобетонных мостов | 64 |
| Выводы по главе II..... | 76 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Глава III МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ..... | 78 |
| III.1. Учет хлоридной коррозии при прогнозировании срока службы железобетонных пролетных строений..... | 78 |
| III.2. Методика оценки эксплуатационного и предельного состояний элементов поврежденных коррозией..... | 83 |
| III.3. Оценка проектного ресурса типовой изгибаемой железобетонной балки..... | 93 |
| Выводы по главе III..... | 99 |
| Заключение..... | 102 |
| Список использованной литературы..... | 107 |

ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности и долговечности мостовых сооружений возможно при решении комплекса взаимосвязанных задач. На стадии проектирования – это правильный учет факторов, влияющих на работу железобетонной конструкции, надежный прогноз увеличения нагрузок в перспективе. На стадии изготовления и строительства – повышение качества строительных материалов, применение современных технологий изготовления и сооружения конструкций. На стадии эксплуатации – правильная организация процесса эксплуатации на базе научно-обоснованной методики прогнозирования ресурса. Обеспечение стабильных работающих связей между указанными факторами позволит обеспечить и повысить долговечность конструкции.

Вопросы качества и долговечности строительных конструкций, как в техническом, так и в экономическом аспекте привлекают все большее внимание исследователей. Очевидно, что во многих случаях экономически

оправдано увеличение первоначальных затрат на изготовление конструкции, 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.

В решении задач технической эксплуатации строительного фонда инженерная оценка технического состояния конструктивных элементов, оборудования и сооружения в целом - диагностика - занимает центральное место. Задача диагностики - изучение и определение признаков и причин повреждений, а также разработка способов и средств их анализа и оценки.

Длительное и систематическое изучение стойкости разнообразных железобетонных конструкций в различных условиях эксплуатации, 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. 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. Имеются многочисленные исследования, посвященные проблемам повышения срока службы мостов в условиях коррозии бетона и арматуры.

Однако до настоящего времени по результатам этих данных трудно количественно оценить и прогнозировать запаса прочности для планирования межремонтных сроков. Расчет долговечности и надежности

конструкций должен учитывать динамику процессов протекающих в материале под действием агрессивных сред. Для этого должны быть определены основные характеристики сопротивления бетонов действию химически-активных веществ и определен механизм взаимодействия материала со средой.

Таким образом, исследование, направленное на разработку эффективных способов определения, учета в расчетах мостовых сооружений влияния коррозии бетона и арматуры, является актуальной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Целью работы является совершенствование и разработка современных методов технической диагностики и прогнозирования срока службы железобетонных мостов, имеющие повреждения в виде коррозии бетона и арматуры.

Задачи работы:

- проанализировать коррозионные процессы в железобетонных мостах и сооружениях;
- изучить методы мониторинга, диагностики и способов антикоррозионной защиты эксплуатируемых мостов и сооружений;
- предложение современных методов диагностики и способов регенерации железобетонных конструкций для обеспечения их эксплуатационной надежности;
- разработка принципов методов и средств диагностики коррозионных дефектов в арматуре железобетонных мостов;
- с помощью математических моделей сооружения оценивать и прогнозировать влияние различных эксплуатационных, технологических и

конструкционных факторов на срок службы сооружения, выявлять причины отказов;

Научная новизна работы состоит в совершенствовании современных методов технической диагностики и прогнозирования срока службы железобетонных мостов, имеющих повреждения в виде коррозии бетона и арматуры.

Практическая ценность работы. Полученные в работе результаты и выводы показывают необходимость создания обоснованных с математической точки зрения новых методик расчета прогнозирования надежности и срока службы железобетонных мостов. При этом одним из наилучших методов для диагностики коррозионных повреждений является ультразвуковые, вибрационные и магнитно-индукционные методы. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, строительстве и эксплуатации автодорожных железобетонных мостов.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в 3 публикациях. Работа выполнена в соответствии с календарным планом на 2015-2017 год.

Обзор (анализ) литературы по теме исследования были изучены работы: Еременко В. А., Разумов Е. А., Зяятдинов Д. Ф.; Айталиев Ш. М., Масанов Ж. К., Баймаханов И. Б.; Барбакадзе В. Ш., Мураками С.; Меликулов А. Д., Тоштемиров У. Т.; Баклашов И.В., Тимофеев О.В.; Карцивадзе Г. Н.; Дорман И. Я.; Ишанходжаев А. А., Миралимов М. Х., Халилова Р. Х., И., Исроилов, И, Камалов К., Зокиров О. З., Журавлев В. И., Павлович Ю. Ю.; Мостков В.М.; Давыдов С.С.; Шапошников Н.Н.; [4,7,8,15,16,20,22,24,26,36,37].

Во введении отражены значимость железобетонных мостов, немаловажным фактом является сохранение и защита от повреждений,

рассматриваются коррозионные повреждения как основная причина снижения срока службы железобетонных мостов. Первая глава посвящена изучению коррозионных процессов, описание влияния окружающей среды на процесс коррозии стали в бетоне, влияние плотности и прочности бетона, влияние других климатических и технологических факторов.

В связи с этим возникает проблема безопасной эксплуатации сооружений с учетом множества негативных факторов. Анализ повреждений, аварий и катастроф мостов позволяет прийти к выводу, что большинство из них можно предотвратить путем совершенствования расчетов, повышения периодичности и эффективности диагностики, а также разработки более совершенных инженерных методов прогнозирования и оценки надежности, срока службы и долговечности мостовых конструкций на всех стадиях их работы.

В связи с этим во второй главе приводятся технология и концепция механизированного ремонта железобетонных мостов пораженной коррозией, ремонт и способы усиления, приборы и аппаратуры для обнаружения скрытых дефектов железобетонных мостов.

Третья глава посвящена прогнозированию параметров срока службы железобетонных мостов. Описаны факторы, определяющие надежность сооружений, дана оценка надежности по критериям эксплуатации, спрогнозированы сроки службы железобетонных мостов по признаку коррозии арматуры, составлена вычислительная программа для прогнозирования процесса коррозии в арматуре во времени численным методом.

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованных литературных источников и изложен на 98 страницах текста, включающих 62 рисунков и 4 таблиц.

I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

I.1. Коррозионные процессы в железобетонных мостах и сооружениях

В единой транспортной системе Узбекистана автомобильный и железнодорожный транспорт является ведущим видом транспорта, круглогодично и бесперебойно обеспечивающим грузовые и пассажирские перевозки. При этом немаловажное значение для

обеспечения безопасности и бесперебойности движение поездов имеет состояние искусственных сооружений.

На территории Республики Узбекистан по данным на 2017 год на дорогах общего пользования эксплуатируется 11800 сооружений (в том числе 1464 капитальных) протяженностью около более 300 км. А в Соединенных Штатах Америки, имеется около 583 000 мостов, из которых 235000 изготовлены из обычного железобетона, 108 000 построены с использованием предварительно-напряженного железобетона, 200 000 изготовлены из стали и около 40000 выполнены с использованием других строительных материалов (дерево, камень, композитные материалы) [2].

Средствительно, железобетонные мосты в целом составляют 59%, стальные 34%, а вместе они составляют 93% от всего мостового парка США. По последним данным, в списке ненадежных или функционально устаревших по стране числится 253 521 мост.

В нашей стране также порядка 95% мостовых сооружений выполнены из железобетона. И железобетонные и стальные мостовые сооружения под влиянием окружающей среды подвергаются различным видам разрушения [3, 4]. В связи с резко-континентальности климата территории нашей страны, следует учитывать, что мостовые сооружения эксплуатируются в различных климатических регионах (на севере, в средней части страны, в горной зоне, в сельской местности, в городских условиях, вблизи промышленных предприятий). В процессе эксплуатации на мостовые сооружения оказывают воздействие статические и динамические нагрузки (от собственного веса и проезжающего по ним транспорта, ветровые), температурные условия (весна, лето, осень зима), погодно-климатические воздействия (дожди, туманы, снег, гололед), агрессивные влияния эксплуатационной среды (в промышленных районах атмосферы с высокой влажностью и агрессивными газами (CO₂,

SO₂, NO₂ и т.п.), минеральные вещества и соль при использовании антигололедных материалов, электрические блуждающие токи и токи утечки).

Воздействие вышеуказанных факторов приводит к возникновению и интенсивному протеканию на мостовых конструкциях коррозионных процессов – важнейшей из причин, существенно влияющих на долговечность и надёжность мостов и других транспортных сооружений.

Исключение или сведение к минимуму коррозионных процессов диктуется в современных условиях следующими соображениями:

- необходимостью повышать долговечность (срок службы) мостов, мостовых конструкций, их надёжность (снижение аварийных ситуаций);
- экономическими, связанными с уменьшением материальных потерь металла и бетона (их диссипации в окружающую среду), заменой отдельных элементов конструкций, ремонтными затратами и т.п.;
- экологическими – загрязнение окружающей среды продуктами коррозии, другими экологически опасными веществами (продукты метаболизма при бактериальной и других видах биологической коррозии).

В целом коррозионные проблемы и вопросы защиты от коррозии мостов, транспортных сооружений занимают одно из важнейших мест в вопросах их проектирования, строительства и эксплуатации. Долговечность, надёжность, качество и работоспособность мостовых конструкций и их элементов определяются не только совершенством проекта, правильным выбором материалов (сталей, бетона, арматуры, железобетона, полимеров), качественным исполнением технологии производства, учётом условий эксплуатации, но и грамотным решением коррозионных проблем, сведением

их к минимуму или исключением на стадиях проектирования, строительства, эксплуатации.

Одним из больших преимуществ железобетона по сравнению с металлами и другими материалами является его высокая коррозионная стойкость [4-7]. Однако опыт эксплуатации железобетонных конструкций транспортных сооружений развеял миф о «вечности» железобетона как конструкционного материала, потому что в ряде случаев под воздействием агрессивной среды (атмосферы, грунтов и грунтовых вод, постоянного электрического тока), железобетонные конструкции подвергаются интенсивной коррозии и преждевременному разрушению, что снижает эффективность их применения, а иногда даже создает опасность для движения транспорта [8].

Коррозия бетона (железобетона), подобно коррозии металла, связана с воздействием агрессивной внешней среды, но имеет ряд специфических особенностей. Стандарт СЭВ СТ4419-83 понятие «коррозия» определяет как процесс необратимого ухудшения технических характеристик строительного материала (бетона) в результате физико-химического, химического, биологического воздействия внешней среды или же химических процессов, протекающих в самом материале, изменяющих его структуру и свойства.

Можно сказать, что причиной коррозии бетона является как взаимодействие цементного камня бетона с агрессивными компонентами и факторами внешней среды, так и взаимодействие между составляющими цементного камня. Бетон – многофазная пористая система, находящаяся в равновесии с водой в порах бетона. При $pH=12,5-13$ все составляющие бетон фазы устойчивы. При воздействии внешней агрессивной среды равновесие системы нарушается и в бетоне начинают протекать различные процессы,

приводящие к коррозии. На мостовые конструкции и транспортные сооружения воздействуют различные жидкие агрессивные среды. Это пресные речные воды (опоры мостов), грунтовые воды, атмосферные осадки в виде дождей, туманов, промышленные водные стоки, щелочные и кислые среды и т.п. Согласно современным представлениям, коррозию бетона и железобетона классифицируют в жидких средах на 3 вида:

I вид – коррозия, связанная с воздействием водных сред с малым содержанием солей с преимущественно нейтральной реакцией ($pH=6,8\div 7,2$);

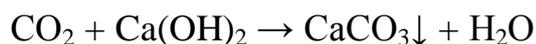
II вид – коррозия при воздействии весьма агрессивных сред, например, кислот, щелочей, некоторых солей, таких, как хлориды натрия или магния;

III вид – коррозия, обусловленная проникновением в поры бетона жидких сред, содержащих компоненты, образующие с поровой жидкостью или цементным камнем нерастворимые кристаллические соединения. Каждый вид коррозии характеризуется своими особенностями, специфическими физико-химическими процессами и реакциями, которые определяют характер коррозионного разрушения.

В железобетоне, наряду с коррозией бетона, может протекать коррозия стальной арматуры. Кроме того, наблюдаются и специфические виды коррозии, связанные, например, с воздействием на бетон и железобетон бактерий, грибов, водорослей и т.п.

Атмосферная коррозия – наиболее распространённый вид коррозии. При этом на бетон воздействуют такие факторы атмосферы, как температура (колебания температур), влажность, наличие в атмосфере газов, осадки в виде дождя, снега и т.п. Сухая атмосфера (относительная влажность $<60\%$) для бетона и железобетона не опасна. При влажности более 60% на поверхности бетона и в капиллярах начинает конденсироваться влага, в которой растворяются различные газы, находящиеся в атмосфере.

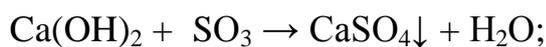
В зависимости от типа атмосферы (промышленная, морская, сельская и т.п.) в ней могут содержаться различные газы, от растворимости которых в плёнке влаги и в объёме капилляров и пор бетона будет создаваться различная агрессивная среда. Поэтому все газы, присутствующие в той или иной атмосфере, делят на 3 группы в зависимости от их способности влиять на процессы взаимодействия с $\text{Ca}(\text{OH})_2$. По С.Н. Алексееву [9] к первой группе относятся газы, образующие с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ малорастворимые или нерастворимые соли с небольшим объёмом продуктов реакции. Это пары плавиковой, уксусной, щавелевой кислот, CO_2 и некоторые другие. Так, при наличии в атмосфере малых концентраций CO_2 в поровой влаге бетона или поверхностной плёнке может протекать реакция:



Образующийся карбонат кальция по объёму ненамного превышает объём $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и не представляет большой опасности для прочностных свойств бетона. Мало того, при оптимальной концентрации CO_2 в воздухе бетон может даже уплотняться. Однако избыточная повышенная концентрация CO_2 может приводить к растворению осадка с образованием растворимого бикарбоната: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, который, вымываясь из бетона, увеличивает объём пор и снижает его прочность.

Другая опасность при наличии в атмосфере таких газов заключается в том, что при их действии на поровую жидкость происходит снижение величины рН, т.е. частичная нейтрализация, и по достижении $\text{pH} < 11,0 \div 11,5$ может начаться коррозия стальной арматуры и бетон начнёт растрескиваться. Ко второй группе атмосферных газов относятся газы, образующие при взаимодействии с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ нерастворимые объёмные продукты реакции.

Это SO_2 , SO_3 , H_2S . Эти газы при взаимодействии с известью $\text{Ca}(\text{OH})_2$ образуют сульфат кальция:



Получающийся гипс CaSO_4 , как было сказано выше, по объёму более, чем в 2 раза больше, чем Ca(OH)_2 , и бетон вначале уплотняется, а затем его поверхностные слои начинают под действием внутренних напряжений отслаиваться от тела бетона и конструкция, в целом, постепенно разрушается. Атмосферы, содержащие такие газы, являются весьма агрессивными по отношению к бетону и железобетону. Третья группа атмосферных газов – газы, образующие при взаимодействии с Ca(OH)_2 растворимые соли. К таким газам относят галогены (Cl_2 , Br_2) и галогенводородные кислоты (HCl , HBr , HI), некоторые органические летучие кислоты (HCOOH , CH_3COOH). При взаимодействии с этими газообразными веществами получают растворимые соли, которые вымываются из бетона, при этом увеличивается пористость бетона, снижаются прочностные свойства. Хлор и галогенводородные кислоты могут вызвать интенсивную коррозию стальной арматуры, вследствие чего будет происходить растрескивание бетона вдоль арматуры. К третьей группе относятся и азотсодержащие оксиды NO , NO_2 , а также азотсодержащие пары кислот HNO_2 , HNO_3 и аммиак NH_3 .

В результате их попадания в поровое пространство бетона протекают реакции образования растворимых нитратов, например: $2\text{NO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca(NO}_3)_2 + \text{H}_2\text{O}$, которые, постепенно вымываясь, делают структуру бетона рыхлой, поровое пространство насыщается солями, которые являются гигроскопичными. Гигроскопичные продукты, такие, например, как нитрат аммония, хлорид аммония, увеличивают скорость поглощения влаги из

атмосферы (примерно в 2 раза), способствуют насыщению бетона водой и дальнейшему его разрушению.

Все газотсодержащие газы являются агрессивными по отношению к бетону и неопасными по отношению к стальной арматуре. Бетонные и железобетонные конструкции, эксплуатирующиеся в различных атмосферных условиях, испытывают воздействие различных факторов. Из множества факторов, определяющих состояние атмосферы, наиболее опасными по воздействию на бетон и железобетон являются повышенная влажность и колебания температуры. Повышенная влажность и контакт бетона с водой приводят к насыщению этого пористого материала влагой; максимальное поглощение воды (водонасыщенность) составляет для тяжёлых бетонов от 4 до 8% от массы бетона, для лёгких бетонов она может достигать 25%.

Водонасыщенность бетона существенно снижает его деформационные и прочностные характеристики. При периодическом увлажнении и высыхании происходит разрыв внутренних связей между компонентами цементного камня и снижение прочности бетона. Наряду с водонасыщением значительное влияние на его прочность и деформативность оказывают температурное воздействие и попеременное замораживание и оттаивание. В этом случае говорят о морозостойкости бетона.

Под морозостойкостью бетона понимают его способность в насыщенном водой состоянии выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание. Критерий морозостойкости – это количество циклов замораживания – размораживания, при котором его прочность снижается не более, чем на 15% при потере массы менее 5%. Это количество циклов определяет марку бетона по морозостойкости F, которая для тяжёлых бетонов может составлять до 1000 циклов (F1000). Марка бетона по

морозостойкости для мостовых конструкций, транспортных сооружений в различных климатических зонах выбирается по соответствующим нормативным документам. Скорость и характер разрушения бетона при многократном замерзании и оттаивании зависит от количества пор (в основном капиллярных), степени насыщения водой, прочности бетона. Чем больше водонасыщенность, тем ниже морозостойкость, тем быстрее разрушается бетон (железобетон).

Водонасыщенный бетон разрушается при отрицательных температурах вследствие расширения воды в капиллярах (~ на 10%) в результате превращения её в лёд. При этом в порах возникает аномально высокое давление, значительно превышающее прочность бетона.. Происходит постепенное накопление локальных микротрещин, которые, сливаясь, перерастают в магистральные трещины. Установлено, что растягивающие напряжения при попеременном замораживании и оттаивании бетона вызывают постепенное разупрочнение его и разрушение. Одна из наиболее опасных и распространённых причин разрушения железобетонных конструкций мостовых сооружений – коррозия стальной арматуры [9-13]. В бетоне стальная арматура находится в контакте с поровой жидкостью, имеющей $pH > 11,8$. Воздействие щелочной среды на сталь переводит её в пассивное состояние, обусловленное формированием на поверхности металла гидроксидов железа. Кроме того, слой бетона, соприкасающийся с арматурой, в той или иной степени, обладает изолирующей способностью и защищает её от коррозии. Коррозионный процесс на стали может развиваться в том случае, если будут созданы условия для протекания электрохимических парциальных реакций: катодного процесса деполяризации и анодного процесса растворения. Это возможно в том случае, если нарушается пассивная плёнка, к поверхности стали проникает кислород (деполяризатор

катодного процесса), создаются локальные катодные и анодные участки и возникает разность потенциалов, т.е. формируются микрогальванопары. Нарушение пассивной плёнки, защищающей металл, возможно по следующим причинам: 1) снижение рН поровой жидкости до величин ниже 11,8; 2) проникновение к поверхности стали агрессивных хлорид-ионов и 3) ускорение анодных процессов растворения стали. Снижение рН поровой жидкости возможно при образовании растворимых веществ и вымывании их из цементного камня; это может происходить при воздействии водных растворов кислот, солей, агрессивных газов. Кроме того, в бетоне всегда достаточно влаги, необходимой для снижения рН. Учитывая, что бетон имеет достаточно высокую пористость, весьма высока вероятность проникновения к поверхности арматурной стали кислорода деполяризатора катодного процесса. Структурная неоднородность арматурной стали, наличие различного рода включений, внутренние напряжения и т.п. создают предпосылки появления микрогальванопар, их активного функционирования, локализации коррозионных процессов, которые могут проявляться в виде питтингов и язв.

Таким образом, для стальной арматуры создаются условия для возникновения и интенсивного протекания коррозионных процессов. Эти процессы могут ускоряться и другими факторами: наличием трещин в бетоне, облегчающих проникновение агрессивных сред к стальной арматуре, собственной коррозией цементного камня, наличием блуждающих токов, недостаточной толщиной слоя бетона. В результате протекания коррозионных процессов на стали происходит снижение механических свойств металла, появление трещин коррозионного растрескивания, особенно для напряжённой арматуры; образование продуктов коррозии большего объёма, отслоение бетона от арматуры.

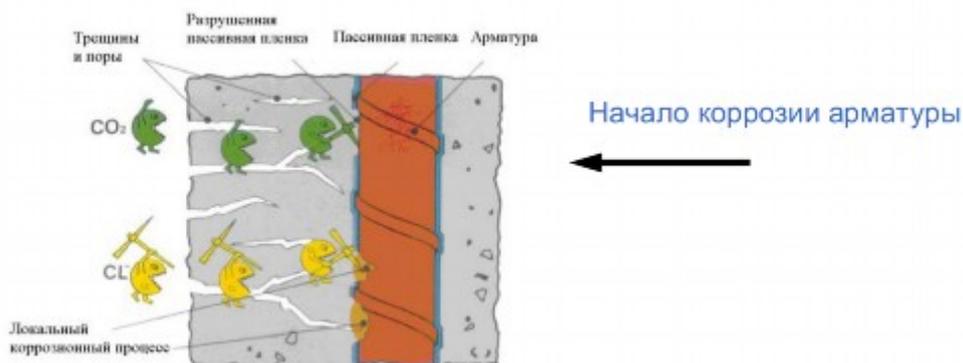


Рис. 1.1. Процесс коррозионного разрушения железобетона при воздействии хлоридов

В конечном счёте, это приводит к разрушению железобетона. Кинетика коррозионного разрушения железобетона иллюстрируется рис. 1.1. Скорость коррозии арматуры зависит от изолирующей способности защитного слоя бетона, его плотности, толщины, химического состава цемента. Внешними признаками коррозии арматуры в бетоне являются [13-16]:

- пятна ржавчины на поверхности бетона вдоль расположения стержней;
- трещины, ориентированные по направлению арматурных стержней;
- отслоение защитного слоя бетона с оголением арматуры, наличие ржавчины на поверхности арматуры.

Состояние арматуры может быть оценено по глубине коррозионного поражения и площади коррозионных повреждений, характеру коррозионных повреждений (сплошная, пятнами, точечная, язвами, налет ржавчины) и толщине и плотности продуктов коррозии.



Условия возникновения
коррозии арматуры

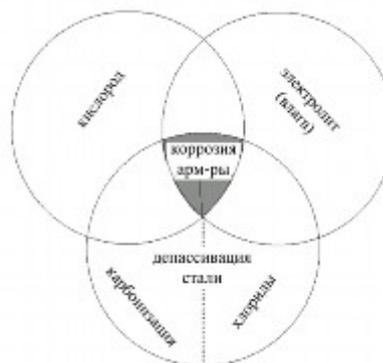
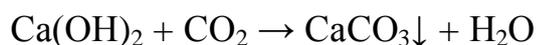


Рис. 1.2. Условия возникновения коррозии арматуры

Коррозия арматуры в бетоне может быть связана с карбонизацией защитного слоя бетона [17], или проникновением и накоплением ионов хлора, или же влиянием кислорода, проникшего через поры, заполненные воздухом (рис. 1.2). При карбонизации происходит взаимодействие поровой жидкости, содержащей $\text{Ca}(\text{OH})_2$, с углекислым газом по реакции:



Образующийся карбонат кальция насыщает поры, уменьшает pH, что приводит к изменению структуры и защитной способности бетона к арматуре. Коррозия арматуры резко возрастает с увеличением содержания хлоридов, бикарбонатной щелочности или температуры окружающей среды. Пассивная пленка на арматуре может быть разрушена вследствие карбонизации защитного слоя или проникновения через него ионов хлора.



Рис. 1.3. Коррозия арматуры в месте разрушения защитного слоя



Рис. 1.4. Повреждения пролетных строений в результате коррозии арматуры

Также важны микроклимат на поверхности конструкции или уменьшение щелочности вследствие вымывания поровой жидкости проточной водой. Если водородный показатель бетона уменьшается до критического уровня $pH < 11,8$; то пассивная пленка разрушается с потерей ее защитных свойств по отношению к арматуре. (рис. 1.3-1.4).

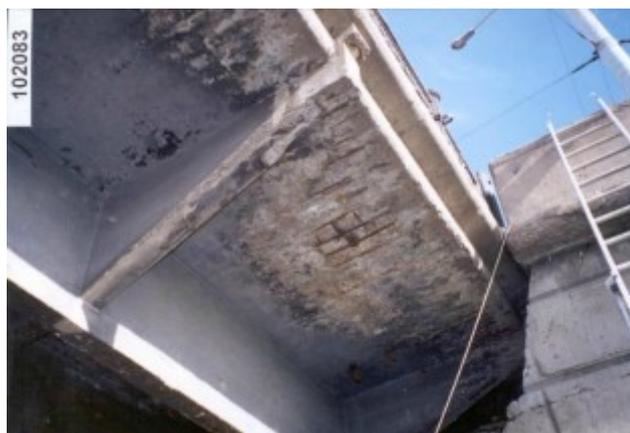


Рис. 1.5. Образование трещин в защитном слое бетона с последующим отслаиванием и разрушением материала

Впоследствии для увеличения долговечности железобетона необходимо обеспечить либо защиту арматуры в бетоне специальным

покрытием, либо защиту поверхности железобетонной конструкции, либо то и другое. Весьма опасным негативным следствием коррозии арматуры в железобетонных конструкциях является то, что продукты коррозии имеют объем в 2 – 9 раз больше прокорродировавшего объема арматуры. Давление продуктов коррозии вызывает образование продольных (коррозионных) трещин в защитном слое бетона с последующим его отслаиванием и нарушением сцепления арматуры с бетоном (рис.1 5).

Коррозионное растрескивание высокопрочной арматуры, находящейся в напряженном состоянии, представляет собой особый и весьма опасный вид коррозии [16]. Он характеризуется образованием нормальных к продольной оси арматуры трещин при локальной коррозии, причем разрушение арматуры может происходить при напряжениях значительно ниже расчетных.

Поведение предварительно-напряженных железобетонных конструкций, армированных сталью, склонной к коррозионному растрескиванию, труднопредсказуемо, так как равномерная коррозия напряженной высокопрочной арматуры вплоть до её разрушения может практически не наблюдаться. Понятно, что внезапные разрушения предварительно-напряженных железобетонных конструкций весьма опасны, так как не сопровождаются нарастанием прогибов и раскрытием трещин, как в случае коррозии обычной арматуры. Высокопрочные арматурные стали имеют склонность к хрупкому разрушению при одновременном действии коррозионной среды и растягивающих напряжений, что наблюдается в предварительно-напряженных конструкциях. К сожалению, особенности коррозии высокопрочных арматурных сталей под напряжением еще недостаточно изучены, хотя исследования в этом направлении ведутся.

I.2. Мониторинг, диагностика и антикоррозионная защита эксплуатируемых мостов и сооружений

Под мониторингом сооружений понимается контроль и управление состоянием сооружения с целью обеспечения надёжной его эксплуатации в течение заданного срока службы. Мониторинг является одним из важных элементов системы эксплуатации сооружений. Мониторинг должен быть организован на всех этапах существования сооружения:

Основой мониторинга является диагностирование на стадиях эксплуатации, проектирования и изготовления объекта. Используются три основных вида диагностирования: функциональное, специальное и модельное. При функциональном диагностировании состояние сооружения устанавливается в процессе его эксплуатации без воздействия диагностических средств. Функциональное диагностирование позволяет реагировать на нарушения в контролируемом объекте и решать задачи как правильности его функционирования, так и определения мест и причин неисправностей (для этого могут использоваться как группы экспертов, так и встроенные в сооружение диагностические средства - сигнализаторы).

При специальном диагностировании технические средства подают на объект специальные воздействия, а диагноз технического состояния формируется в момент времени, когда сооружение не используется по прямому назначению (испытание сооружения нагружением) или же при функционировании сооружения. Весьма важное значение начинает приобретать модельное диагностирование, позволяющее на модельных образцах, элементах сооружения или с помощью математических моделей сооружения оценивать и прогнозировать влияние различных эксплуатационных, технологических и конструкционных факторов на работоспособность сооружения, выявлять причины отказов.

Воздействие эксплуатационной среды определяется её свойствами, характеризующими влияние внешних факторов (агрессивность атмосферы, климатические воздействия, воздействие воды, свойства грунтов и т.д.). Степень влияния среды зависит от технологических факторов (обеспечение условий контакта конструкции с элементами эксплуатационной среды - температуры, давления, скорости среды), от наличия необходимой защиты от воздействия среды, от эксплуатационных изменений в составе и характере воздействия внешней среды. В связи с изложенным ясно, что задача корректной оценки сопротивляемости сооружений разрушению с учётом всех взаимодействующих факторов весьма сложна и в настоящее время только намечаются подходы к её решению

При диагностике железобетонных мостов в настоящее время применяются методы: неразрушающего контроля прочности бетона; инструментального контроля размеров и положения конструкции; статические и динамические испытания; визуальный осмотр.

Так, для определения прочности бетона рекомендуется молоток D1G1-Schmidt2 [18]. Традиционный молоток Шмидта оснащен электронным устройством со встроенными графиками перевода в значение прочности на сжатие. Прибор автоматически корректирует направление удара, статически обрабатывает результаты измерений с выводом на ПЭВМ.

Особый интерес представляет локатор арматуры «Profometer4» [19]. Он предназначен для поиска арматуры, измерения толщины защитного слоя и определения диаметра арматуры и обладает уникальной возможностью представлять на жидкокристаллическом дисплее слой бетона с заложенной в нем арматурой в системе координат. Прибор точно измеряет защитный слой бетона до 120 мм – при помощи точечного пробника, методом

неразрушающего контроля определяет диаметр арматуры с точностью до 1 мм. Данные измерений могут быть занесены в память для дальнейшей обработки на ПЭВМ. При инструментальном контроле измеряются строительные подъемы главных балок и их основные геометрические размеры. Наряду с инструментальными методами применяется и визуальный контроль наличия и характера трещин в главных балках пролетных строений с определением величины их раскрытия микроскопом МПБ-2. Статические и динамические испытания проводятся с целью определения прогибов, удлинений и напряжений в элементах конструкции. Методика обладает рядом преимуществ: точность измерений, мобильность, универсальность. К недостаткам этой методики следует отнести привязанность к источникам питания, трудности установки датчиков, дополнительные затраты средств и времени по созданию испытательных нагрузок. Анализ обнаруженных дефектов и повреждений указывает на закономерности их появления. Причинами преждевременного разрушения железобетонных конструкций мостов, на наш взгляд, являются: влияние агрессивной среды на трещинообразование, усталостное разрушение бетона от воздействия эксплуатационных нагрузок, неудовлетворительное текущее содержание, что влечет за собой разрушение системы водоотвода, выщелачивание бетона, разрушение защитного слоя и коррозию рабочей арматуры (рис..1.6-17.).

Перспективные методы диагностики предполагают:

- создание диагностических комплексов на базе ПЭВМ, усилителей, аналогоцифровых преобразователей и датчиков для регистрации измерений, их анализа и занесения в базу данных;
- разработку и внедрение методики прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов.

Необходимо отметить, что капитальный ремонт и усиление железобетонных конструкций мостов невозможно проводить без тщательной диагностики сооружения, выполнения детального обследования.

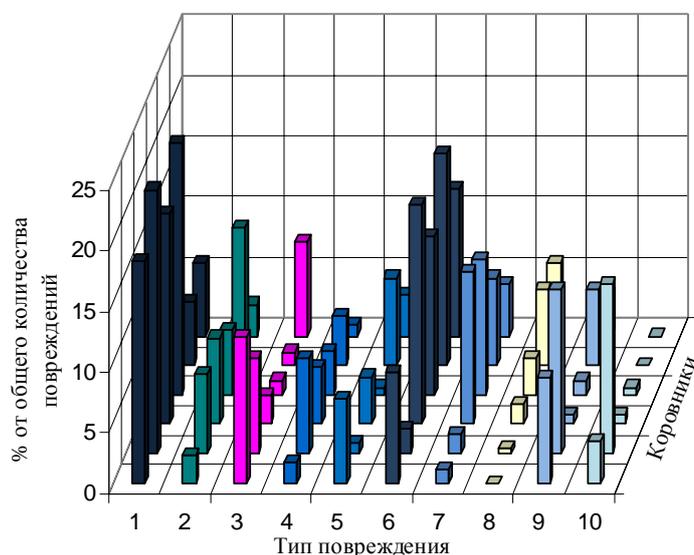


Рис.1.6. Классификация наиболее значительных повреждений ребристых плит покрытия (срок эксплуатации 25 лет)

(1 – оголение и коррозия рабочей арматуры на отдельных участках; 2 – оголение и коррозия арматурных стержней поперечных ребер на отдельных участках; 3 – оголение и коррозия арматурной сетки полки на отдельных участках; 4 – отслаивание защитного слоя бетона на отдельных участках; 5 – размораживание бетона на глубину 3–10 мм; 6 – сколы бетона на глубину до 20 мм; 7 – сколы бетона на глубину более 20 мм; 8 – увлажнение на отдельных участках; 9 – прогиб плиты на величину менее $L/200$; 10 – продольные трещины по продольному ребру шириной раскрытия до 0,3 мм)

Причем, в случае усиления конструкции композиционными материалами, её диагностика и анализ напряженно-деформированного состояния играют ключевую роль при принятии решения об усилении. Выполнение диагностики необходимо для определения реальных геометрических параметров конструкции, фактических свойств ее материалов и их распределения по сечению.

Диагностика железобетонных мостов позволяет не только выявить степень их износа, но и определить причины этого явления. Все это возможно выполнить с помощью современных приборов для диагностики и неразрушающего контроля строительных конструкций.



Рис.1.7 .Разрушение плиты проезжей части балки, коррозия арматуры плиты, оголение и коррозия арматуры опоры и плиты

Вопросам защиты от коррозии бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений уделяется недостаточно внимания. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии должна исходить из условий эксплуатации, факторов, воздействующих на механизм и скорость развития коррозионного процесса. В соответствии с нормативными документами для предохранения от коррозии бетона и железобетона предусматриваются мероприятия первичной и вторичной защиты. Первичная защита предусматривает оптимальный с точки зрения коррозионных

факторов выбор проектно-конструктивных решений железобетонных конструкций, применение способов и материалов для изготовления коррозионно-стойких бетонных и железобетонных конструкций на стадиях проектирования и строительства. К ним относятся: выбор расчетно-конструктивных решений по оптимальным размерам, форме поперечных сечений конструкции, снижающих влияние коррозионных факторов; рациональные конструкторские решения, уменьшающие поверхность контакта железобетонных элементов с агрессивной средой, а также разработка эффективных конструкций мостового полотна (без сплошных барьерных ограждений), обеспечивающих разрушение гололёдной корки вследствие деформаций пролётных строений под временной нагрузкой и удаление продуктов разрушения гололёдной корки путём их сметания с проезжей части ветром; разработка эффективных стратегий эксплуатации железобетонных конструкций, приводящих к снижению объёма применения хлоридсодержащих противогололёдных реагентов; рациональный выбор арматурных сталей; подбор необходимых составов бетона, обеспечивающих необходимый уровень защиты; снижение проницаемости бетона; использование добавок, улучшающих физико-технические характеристики бетонов (ингибирующие, пластифицирующие, регулирующие pH, уменьшающие трещиностойкость бетона, снижающие склонность к коррозионному растрескиванию и т.п.); технологические мероприятия, повышающие качество бетона и железобетона; использование эффективных противокоррозионных добавок в бетон.

Вторичная защита предусматривает применение защитных средств и материалов сразу после ввода объекта в эксплуатацию и в процессе эксплуатации. К методам вторичной защиты относятся: применение лакокрасочных материалов; применение рулонных, листовых материалов;

использование облицовочных, оклеечных материалов; применение уплотняющих пропиток, пропиточно-кольматирующих составов, цементации, силикатизации и т.п.; использование биоцидных материалов.

Например по защите от коррозии железобетонных опор мостов через реку, учитывая длительный срок строительства опор и их досрочную практическую эксплуатацию, было принято решение повысить долговечность опор применением пропиточной грунтовки и вторичной защиты от коррозии путем нанесения на поверхности конструкций лакокрасочных материалов (рис.1.8).



Рис. 1.8. Фрагмент грунтовки опоры моста

Пропиточная грунтовка наносится на обработанную в соответствии с Регламентом поверхность, при этом глубоко проникает в защитный слой конструкции, связывает остаточную влагу и упрочняет поверхностный слой, обеспечивая высокую адгезионную способность. Слои вторичной защиты от коррозии лакокрасочными материалами Stelpant после нанесения на поверхность удерживают влагу внутри бетонной конструкции и тем самым повышают ее прочность. Последние испытания НИИЖБ бетонных образцов, покрытых защитными системами, близкими вышеуказанным из

полиуретановых лакокрасочных материалов Stelpant, показали, что они имеют высокие защитные и эксплуатационные свойства, а именно:

I.3. Методы оценки надежности и долговечности мостовых железобетонных конструкций

Надежность и долговечность мостов определяется условиями их эксплуатации, своевременным и качественным проведением работ по диагностике и ремонту. Большой вклад в развитие теории надежности и долговечности конструкций внесли Иосилевский Л. И., Перельмутер А. В., Лантух-Лященко А. И. [20-25]. В последние годы проблеме обеспечения надежности строительных конструкций и связанными с этим вопросами их диагностики и усиления посвящены статьи [25-27].

Основным фактором, характеризующим долговечность мостового сооружения, является изменение уровня надежности конструкции во времени. В первую очередь это связано с накоплением различных дефектов и повреждений элементов конструкции.

Обследованиями, позволяющими оценить состояние авто и железнодорожных мостов в Республике Узбекистан, занимаются целый ряд крупных государственных и акционерных учреждений: Узогирсаноатлойиха», «Тоштемирйуллойиха», «Боштранслойиха», «Йуллойиха бюроси» и др. Принятой формой представления результатов плановых осмотров мостовых сооружений является отчет. Как правило, в зависимости от поставленной задачи, эти отчеты содержат проектные характеристики сооружения, даты постройки и ремонта, подробную информацию о дефектах.

Основной целью написания отчета является оценка соответствия работы конструкций проектным предпосылкам и оценка ресурса моста.

Пролетные строения из железобетона на дорогах стали применять в начале прошлого века. Конструкции из обычного железобетона имеют возраст около 100 лет, а из предварительно напряженного железобетона – 55–60 лет. В настоящее время железобетон как материал для пролетных строений мостов получил весьма широкое распространение и с каждым годом удельный вес железобетонных конструкций увеличивается. Железобетонные мосты на сети автомобильных и железных дорог стран СНГ составляют до 70% от общей длины мостов, а общий объем железнодорожных мостов по данным института Гипротранспуть, в настоящее время превышает 1,5млн.м³ [26].

Современные нормы проектирования железобетонных мостов позволяют проектировать экономичные и надежные конструкции. Вместе с тем следует отметить, что проблема перерасчета эксплуатируемых мостов в настоящее время остается наиболее актуальной. Это объясняется тем, что последние годы наблюдается интенсивное развитие различных повреждений и неисправности, снижающие грузоподъемность пролетных строений.

В табл. 1.1. приведены результаты обследования более 10 тыс. железобетонных пролетных строений, имеющих возраст от 65 до 30 лет, эксплуатируемые в различных регионах СНГ [27].

Из табл. 1.1. видно, что процентное соотношение снятых пролетных строений по различным причинам независимо от возраста практически не меняется. В большинстве случаев причиной замены служили появление трещин в бетоне и коррозия арматуры, отколы защитного слоя бетона [81].

Аналогичная ситуация наблюдается на дорогах развитых стран. Так, по данным средний срок службы мостовых конструкций в США снизился до 35 лет, и ежегодно разрушаются 209 мостов, а в общем – 80% всех мостов требуют различного рода ремонта.

В этом отношении наиболее неблагоприятным являются условия Республики Узбекистан, где в летнее время температура на поверхности бетона конструкций, подверженных воздействию солнечной радиации, достигает до 80°C, а относительная влажность внешней среды при этом снижается до 6%.

Таблица 1.1

Результаты анализа срока службы эксплуатируемых пролетных строений

| Срок службы, лет | Количество обследованных пролетных строений | Количество снятых пролетных строений | Процент снятых пролетных строений |
|------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 65 | 1194 | 78 | 5,02 |
| 60 | 702 | 36 | 5,12 |
| 50 | 1350 | 65 | 4,82 |
| 55 | 3250 | 199 | 6,12 |
| 30 | 4220 | 121 | 3,1 |

Обследование эксплуатируемых пролетных строений показывают, что такие условия способствуют интенсивному развитию повреждений в структуре бетона, влияющих на несущую способность и долговечность сооружений. Ежегодные потери денежных средств железной дороги из-за ограничения скорости движения поездов на поврежденных мостах доходит до значительных величин. В целом по дороге за период с 1996 по 2008гг. по различным причинам заменено 178 железобетонных пролетных строений мостов, что почти на 1,5 раза больше, чем по другим дорогам страны, объемы грузоподъемности уменьшились [28-30].

Как показывает анализ документации по замене эксплуатируемых пролетных строений, часть конструкций заменена без должного обоснования. Причиной этому явилось отсутствие научно-обоснованной методики оценки остаточного ресурса по фактическому состоянию эксплуатируемых

конструкций. В отмеченных выше условиях повышается актуальность правильного перерасчета эксплуатируемых пролетных строений мостов по результатам технической диагностики и определение остаточного ресурса по эти данным. В соответствии с [27-30] работоспособность конструкций определяется показателями грузоподъемности к моменту технической диагностики, а рекомендации по прогнозированию грузоподъемности на перспективу в указанных документах отсутствуют. Имеется также ряд методических указаний, где приводится методика оценки, состояния элементов конструкций мостов в момент технической диагностики. Согласно [31], состояние эксплуатируемого пролетного строения оценивается по результатам обследования по качественным признакам. При этом предлагается все неисправности разделить на четыре категории. Предполагается, что категории неисправностей являются укрупненными показателями грузоподъемности.

В работах предлагается обобщение оценки технического состояния конструкций моста. В обобщенный параметр включен комплекс данных, характеризующих качества сооружения. На этой базе разработан способ расчета грузоподъемности конструкций по методу допускаемых технических состояний. По этим данным невозможно оценить влияние предыстории нагружения на грузоподъемность конструкций мостов и изменение основных технических параметров во времени в связи с изменениями условий эксплуатации. Поэтому не представляется возможным прогнозирование остаточного ресурса пролетных строений, что в свою очередь не позволяет обоснованно планировать капитальные вложения на ремонтно-восстановительные мероприятия.

Попытка изменить эту ситуацию предпринята В.И. Шестериковым, предложившим наиболее оценивать техническое состояние массовых

автодорожных мостов по показателю их физического износа, что было учтено в [30-34]. В отличие от прежних подходов состояние моста оценивается по элементам – от перекрытия до несущих конструкций (пролетных строений и опор), по которым можно установить и обобщенный показатель износа сооружения как сумму частных износов, взятых со своими коэффициентами значимости. Физический смысл показателя износа – доля средств, необходимых по разным причинам за прошедший срок эксплуатации. Износ пролетного строения определяется как снижение его грузоподъемности, а износ балки пролетного строения – как снижение ее несущей способности. При определении износа балки учитываются по возможности все дефекты, зарегистрированные на момент обследования.

В основном это дефекты, связанные с деструкцией и коррозией материалов – бетона и арматуры. Наиболее весомыми из них являются снижение плотности и прочности бетона, снижение жесткости балки из-за шелушения и разрушения защитного слоя, появление трещин в бетоне, коррозия арматуры. Все эти показатели можно достаточно точно определить непосредственно на объекте и на их основании установить расчетом фактическую несущую способность балки. Приведена методика определения степени потери потребительских свойств (функций) и других элементов моста, которые в совокупности дают представление о затратах на восстановление.

Экономическую основу имеют и предложенные коэффициенты значимости элементов, которые определены через ущерб, наносимый дороге, транспортными средствами и эксплуатационным службам предельным износом. Фактический ущерб при предельном износе элемента представляет собой стоимость замены элемента в относительных показателях. Наличие экономической основы в показателях износа дает возможность автору

сравнить между собой износы различных элементов, имеющих разные критерии потери своих функций, и определить аналогичные показатели для систем сооружения:

- мостового полотна (включает покрытие, изоляцию, систему водоотвода, сопряжение с насыпью, деформационные швы, ограждения, тротуары, перила);

- пролетного строения (включает балки, поперечные связи, плиту, опорные части);

- опор (включает ригель, тело, фундамент).

По аналогии с существующими нормативными документами, по которым, например, для общестроительных и железнодорожных конструкций предельный износ нормирован 50-60% [27-34], предложено нормировать предельные значения износов всех элементов автодорожных и железнодорожных мостов. Для автодорожных мостов экономически оправдана замена следующих элементов:

- системы водоотвода при ее износе – 55–60%;

- сопряжения моста с насыпью – 65–70%;

- покрытия – 75–80%;

- гидроизоляция – 50%;

- ограждений – 90%;

- тротуаров – 75–80%;

- перил – 80–85%;

- деформационных швов – 50%.

Мостовое полотно выгоднее заменить новым при его износе не менее 65%. Предельный износ для пролетных строений определен с учетом накопленного опыта по восстановлению несущей способности (усилению) при использовании технологий, не требующих перекрытия движения на

длительный срок или строительства объездов. Отработанные методы усиления ребристых железобетонных балок с обычной арматурой, имеющиеся и проверенные на практике методы усиления других конструкций позволяют в настоящее время эффективно восстанавливать несущую способность пролетных строений с износом до 75%; для конструкций с предварительно напряженной арматурой – до 50-70% [27].

Знание предельного износа позволяет более или менее объективно установить, когда элемент должен быть заменен новым.

I.4. Выводы по главе I

Повышение надежности и долговечности мостовых сооружений возможно при решении комплекса взаимосвязанных задач. На стадии эксплуатации – правильная организация процесса эксплуатации на базе научно-обоснованной методики прогнозирования ресурса. Обеспечение стабильных работающих связей между указанными факторами позволит обеспечить и повысить долговечность конструкции.

В решении задач технической эксплуатации строительного фонда инженерная оценка технического состояния конструктивных элементов, оборудования и сооружения в целом - диагностика - занимает центральное место. Задача диагностики - изучение и определение признаков и причин повреждений, а также разработка способов и средств их анализа и оценки.

Длительное и систематическое изучение стойкости разнообразных железобетонных конструкций в различных условиях эксплуатации, 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. 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. Имеются многочисленные исследования, посвященные проблемам повышения долговечности конструкций мостов в условиях коррозии бетона и арматуры. Однако до настоящего времени по результатам этих данных трудно количественно оценить грузоподъемность эксплуатируемых пролетных строений мостов и прогнозировать запаса прочности для планирования межремонтных сроков. Расчет долговечности и надежности конструкций должен учитывать динамику процессов протекающих в материале под действием агрессивных сред. Для этого должны быть определены основные характеристики сопротивления бетонов действию химически-активных веществ и определен механизм взаимодействия материала со средой.

Таким образом, исследование, направленное на разработку эффективных способов определения, учета в расчетах мостовых сооружений влияния коррозии бетона и арматуры, является актуальной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Поэтому целью магистерской диссертационной работы является совершенствование и разработка современных методов технической диагностики железобетонных конструкций мостов имеющих повреждения в виде коррозии бетона и арматуры для определения срока службы эксплуатируемых транспортных сооружений. Для достижения этой цели должны быть сформулированы следующие задачи:

- проанализировать коррозионные процессы в железобетонных мостах и сооружениях;

- изучить методы мониторинга, диагностики и способов антикоррозионной защиты эксплуатируемых мостов и сооружений;
- предложение современных методов диагностики и способов регенерации железобетонных конструкций для обеспечения их эксплуатационной надежности;
- разработка принципов методов и средств диагностики коррозионных дефектов в арматуре железобетонных мостов;
- с помощью математических моделей сооружения оценивать и прогнозировать влияние различных эксплуатационных, технологических и конструкционных факторов на работоспособность сооружения, выявлять причины отказов.

II. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ КОРРОЗИОННЫХ ДЕФЕКТОВ

II.1. Совершенствование методики технической диагностики железобетонных конструкций мостов

В решении задач технической эксплуатации строительного фонда инженерная оценка технического состояния конструктивных элементов, оборудования и сооружения в целом – диагностика занимает центральное место. *Задача диагностики* - изучение и определение признаков и причин повреждений, а также разработка способов и средств их анализа и оценки. Диагностика базируется на учении о физическом износе и коррозии строительных конструкций и основывается на следующих методиках [25, 45]:

- визуального определения износа по внешним признакам;
- инструментальной оценки состояния конструкций и зданий с помощью приборов;
- инженерного анализа диагностических данных с целью оценки

технического состояния и разработки мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту зданий и сооружений.

Диагностируемые в процессе эксплуатации фактические нагрузки могут существенно отличаться от предусмотренных проектов, как по величине, так и по месту приложения. В связи с этим устанавливают систематический контроль за эксплуатационными нагрузками, которые не должны превышать нормируемых величин. При этом кроме действительной величины нагрузки от собственной массы конструкций, контролируется:

- место приложения статических и динамических нагрузок от технологического оборудования и их величина;
- места складирования материалов, полуфабрикатов, готовой продукции и величины предельных нагрузок от них;
- грузоподъемность и режим работы мостовых, консольных, козловых и других грузоподъемных кранов и устройств, различного подъемно-транспортного оборудования (тельферы, автопогрузчики и т.п.);
- места повышенных снеговых и пылевых отложений на покрытии.

К эксплуатационным воздействиям относятся:

- температурный режим эксплуатации конструкций, зависящий от технологических и природно-климатических условий;
- деформации фундаментов, вызываемые общими и локальными изменениями гидрогеологических свойств основания (появление техногенных вод, повышение уровня грунтовых вод, протечки в грунт химически активных жидкостей, строительные работы в непосредственной близости от фундаментов и т. п.);
- увеличение, по сравнению с проектной, степени агрессивности среды (повышение содержания в воздухе агрессивных газов, жидкостей, пыли, абразивное воздействие сыпучих сред и т.п.).

Сильно действующим фактором износа строительных конструкций является их увлажнение. Воздействие влаги усиливается при колебаниях температуры и влажности, а также при загрязнении окружающей среды агрессивными примесями. Повышение влагосодержания характерно для многих конструкций, контактирующих с водой в процессе изготовления и эксплуатации. При этом различают пять видов увлажнения:

- при изготовлении конструкций (строительная влага);
- атмосферными осадками;
- утечками из водопроводно-канализационной сети;
- конденсатом водяных паров воздуха;
- капиллярным и электроосмотическим подсосом;
- грунтовой водой.

Составление дефектных ведомостей при обследовании сооружений.

При обследовании конструкций выявляются дефекты, которые целесообразно заносить в ведомости или таблицы. Они могут быть произвольной формы, например, в виде таблицы, и дают привязку дефекта (местоположение, расстояния от осей, этаж и т. д.); обозначают схематично дефект и дают его геометрические размеры; подробно описывают дефект и указывают предполагаемые причины его возникновения; методы устранения дефекта, предполагаемые в данный период и др. Если обследуется большеразмерная конструкция, в которой много дефектов [19, 23].

Проведение проверочных расчетов конструкций при обследовании сооружений. Проверочные расчеты основных несущих конструкций сооружений являются одним из важнейших этапов обследования сооружений. Они оказываются необходимыми в следующих случаях [14]:

- при недостаточности или полном отсутствии расчетных данных, с чем часто приходится встречаться при обследованиях уже эксплуатируемых

сооружений с несохранившейся документацией;

- при наличии несоответствий между расчетными предпосылками и установленными при обследовании фактическими данными в отношении принятой расчетной схемы, нагрузок, размеров, свойств материалов и т. д.;

- при наличии дефектов и повреждений, влияющих на несущую способность и деформативность сооружения.

Проверочные расчеты позволяют установить несущую способность и пригодность к нормальной эксплуатации конструкций в изменившихся условиях их работы, выявить элементы и соединения, требующих принятия своевременных мер (замены, усиления, ремонта), дать рекомендации о необходимых ограничениях по величине нагрузки, скорости движения и т. д. Расчеты выполняют с учетом результатов обследования: выявленных дефектов, отклонений от размеров, коррозионного износа, реальных прочностных свойств материала, действительных прочностные и деформативные характеристики материалов, расчетных схем и нагрузок, температурных воздействий, осадок фунтов и т. д.

Проведение проверочных расчетов обследуемых строительных конструкций зданий и сооружений можно разделить на два этапа:

- 1) определение несущей способности отдельных элементов (расчет по предельным состояниям первой группы);

- 2) определение усилий в конструкциях от внешних нагрузок и воздействий, соответствующих проектному заданию на реконструкцию. В случаях, когда конструкции выполнены в соответствии с проектом и не имеют дефектов и повреждений, при наличии технической документации, включая данные о их несущей способности, проверочные расчеты могут быть выполнены в ограниченном объеме: производят сопоставление внутренних усилий, возникающих от расчетных нагрузок, с несущей

способностью конструкций, приведенной в технической документации [19].

Целесообразно выделить среди подлежащих проверке расчетом конструкций две группы: не имеющие дефектов (повреждений) и с дефектами (повреждениями), способными снизить несущую способность элементов. Конструкции первой группы при условии их эксплуатации под проектной нагрузкой не менее 10 лет, а также в случаях, когда предлагаемые в дальнейшем изменения нагрузок не приведут к увеличению внутренних усилий (M, N, Q), могут проверяться расчетом по нормам, действующим во время их проектирования. В противном случае расчет конструкций следует выполнять по нормам, действующим на момент обследований.

При отсутствии в конструкциях дефектов и повреждений, недопустимых прогибов и трещин проверочные расчеты допускается выполнять по проектным данным о размерах сечений, расчетным сопротивлениям материалов, расчетной схеме, армирования и т. д. В табл. 2.1 представлены основные расчетные формулы для проверочных расчетов конструкций из разных материалов. Наглядно видно, что они, в основном, схожи и отличаются только для железобетонных элементов. При выполнении расчетов металлических конструкций необходимо учитывать влияние коррозионных повреждений [19, 23].

Таблица 2.1

Основные расчетные формулы для проверочных расчетов

| Материал, элемент | Металл | Бетон | Железобетон |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------|---------------|
| Растянутый | $N \leq A_n R_\gamma \gamma_c$ | $N < A_\delta R_{bt}$ | $N < R_a A_a$ |
| Сжатый – на прочность – на устойчивость | $N \leq A_n R_\gamma$ $N \leq \varphi A R_\gamma$ | $N < \alpha R_b A_b$ | |

| | | | |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Изгибаемый | $W_{\min} \cdot R_{\gamma} \gamma_c$ $M < Q \leq (I \cdot t \cdot R_s \cdot \gamma_c) / S$ $f < [f]$ | $M < \alpha R_{bt} \cdot W_{pl}$ $W_{pl} = b \cdot h^2 / 3,5$ | $M \leq R_b b_x (h_0 - 0,5x) +$ $+ R_a \cdot A_a (h_0 - a')$ $Q \leq 0,34 \varphi_{w1} \cdot \varphi_{b1} \cdot R_b \cdot b h_0$ $f < [f]$ |
| Внецентренно растянутый | $(N / A \cdot R_{\gamma})^n +$ $+ M / cW \cdot R_{\gamma} < 1$ $N / A + M / W \leq R_{\gamma}$ | | $N_e < R_a A'_a (h_0 - a')$ $N_e < R_a A_a (h_0 - a')$ |
| Внецентренно сжатый – на прочность – на устойчивость | $N / A + M / w \leq R_{\gamma}$ $N < \varphi_e \cdot A \cdot R_{\gamma} \cdot c$ | $N \leq R_b \cdot A_b$ | $N_e < R_b x (h_0 - 0,5x) +$ $+ R_a A'_a (h_0 - a')$ |

При расчете изгибаемых элементов момент сопротивления равен:

$$W_{ef} = (1 - K_{sw} \Delta^*) W_0,$$

где: W_0 – момент сопротивления сечения без учета коррозии; K_{sw} – коэффициент изменения момента сопротивления от коррозионного износа. N , M – соответственно сила и изгибающий момент в рассчитываемом сечении элемента; b , h – высота и ширина сечения; A , W – соответственно площадь и момент сопротивления сечения элемента или арматуры; R – расчетное сопротивление материала элемента; t – толщина стенки балки; e – эксцентриситет; x – высота сжатой зоны; φ , γ , m_g , ω – коэффициенты, подбираемые из условий работы.

По окончании всего цикла работ по обследованию, после анализа всех полученных материалов, членами комиссии составляется заключение о техническом состоянии объекта, которое подписывается всеми членами комиссии и заверяется печатью соответствующего учреждения. В заключении должны быть освещены такие вопросы:

1) на основании какого приказа или распоряжения назначена комиссия по обследованию. Состав комиссии, сроки проведения обследования.

Задание на обследование и кем оно выдано;

2) перечень документов, используемых комиссией при обследовании; использованные первоисточники (техническая документация и т.п.);

3) краткое описание архитектурно-планировочного решения сооружения и основных несущих конструкций;

4) технология производства на объекте, условия эксплуатации конструкций;

5) результаты натурного обследования конструкций, основные выявленные дефекты, их причины и возможные последствия; даты выполнения обследований и проверочные расчеты;

6) прочностные характеристики материалов конструкций;

7) данные о фактических нагрузках на конструкции;

8) результаты проверочных расчетов конструкций с учетом реальных расчетных схем, нагрузок, дефектов и ослабления сечений и т. д.

9) выводы о несущей способности основных конструкций и первоочередные мероприятия по обеспечению безопасности людей. Рекомендации по ремонту или усилению конструкций, необходимости дальнейшего наблюдения за объектом и т. д.

К методике оценки физического и эксплуатационного состояния мостов. Для оценки физического состояния элементов моста предлагается выделить категории неисправностей в соответствии с их степенью эксплуатационной опасности и технологической возможностью их устранения [10]. Степень эксплуатационной опасности можно определить показателем дефектности

$$D_i = \frac{P_i - \sum \Delta P_i}{P_i}$$

где P_i - численное значение проектного i -го параметра конструкции которым может быть: длина конструкции (L) м, площадь поверхности бетона

(А) м², объем (V) м³, общая масса (Q) кН, предельный прогиб (f_{пр}) см, предельная осадка опор (ΔН) см и пр.);

$\sum \Delta \Pi_i$ - суммарная величина *i*-х дефектов, подчиненных размерам исходных параметров Π_i ;

Таким образом, показатель дефектности может служить основой разделения по категориям:

I-ая категория при $D_i=1.0 \div 0.9$ – дефекты не влияют на физическое состояние элементов моста. Движение транспорта не ограничивается. Дефекты устраняются при проведении работ по содержанию.

II-ая Категория – $D_i < 0.9$ и > 0.8 – дефекты не значительно влияют на физическое состояние элементов моста, но могут создавать предпосылки опасного развития. Устранения таких дефектов может достигаться текущим ремонтом.

III-ая категория – $D_i < 0.8$ и > 0.6 дефекты значительно понижают физическое состояние элементов моста и требуется их немедленное устранения проведением работ среднего ремонта;

IV-ая категория $D_i \leq 0.6$ – Дефекты существенно снижают физическое состояние элементов моста, создают аварийную ситуацию и требуют срочного капитального ремонта отдельных элементов моста или реконструкции моста в целом.

Показатели дефектности определяют физическое состояние конструктивных элементов моста и могут служить основанием для определения эксплуатационного коэффициента технического состояния

$$K_{\tau} = \frac{\sum \alpha_i D_i}{\sum \alpha_i}$$

где α_i – коэффициент влияния *i*-тых дефектов по элементам моста, значения коэффициентов α принимается:

$\alpha = 0,9$ – для элементов проезжей части и тротуаров;

$\alpha = 0,7$ – для несущих конструкций пролетных строений;

$\alpha = 0,8$ – для опор;

$\alpha = 0,85$ – для береговых подходов.

Дополнительными показателя эксплуатационного состояния моста могут использоваться следующие:

- коэффициент габарита моста, определяющий условие пропуска транспорта по проезжей части

$$K_r = \frac{\Gamma_m}{\Gamma_d}$$

где Γ_m – габарит моста по данным фактического обследования и измерения, м;

Γ_d – ширина дороги на подходах, м

- коэффициент безопасности, учитывающий несоответствия скоростей движения по дороге и мосту;

$$K_v = \frac{V_m}{V_d}$$

где V_m и V_d – фактическая скорость движения, соответственно по мосту и дороге;

- коэффициент отверстия моста учитывающий условие пропуска паводковой воды

$$K_{отв} = \frac{\Omega_\phi}{\Omega_p},$$

где Ω_ϕ – фактическая площадь отверстия моста при высокой воде, м²;

Ω_p – расчетная площадь отверстия по гидрологическим обследованиям;

- коэффициент грузоподъемности, учитывающий фактическую грузоподъемность на момент обследования.

$$K_m = \frac{M_{пред}}{M_{max}}$$

где $M_{пред}$ – предельной изгибающий момент, полученный при испытаниях наиболее опасной несущей конструкции моста;

M_{max} – максимальный расчетный изгибающий момент. На действие нормативных постоянных и временных нагрузок.

Основным критерием эксплуатационной оценки является минимальное значение одного из коэффициентов.

Для решения вопроса о реконструкции моста проводится анализ всех эксплуатационных показателей. Ориентировочные предельные значения показателей эксплуатационного состояния мостов по категориям неисправностей приведены в таблице 2.

Таблица 2.2

Категории неисправностей мостов

| Категории неисправностей | Предельные значения показателей эксплуатационного состояния | | | | | Мероприятия по устранению неисправности |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------|------------|------------|-----------|---------|-----------------------------------------|
| | K_T | K_G | K_V | $K_{отв}$ | K_M | |
| I | $1,0 > 0,9$ | $\geq 1,0$ | $\geq 1,0$ | 1,0 | 1,0 | Содержание элементов моста |
| II | $< 0,9 > 0,8$ | $\geq 1,0$ | $\geq 1,0$ | 1,0 | 1,0 | Текущий ремонт |
| III | $< 0,8 > 0,7$ | $\geq 1,0$ | $\geq 1,0$ | 1,0 | 1,0 | Средний ремонт |
| IV | $< 0,7$ | $< 1,0$ | $< 1,0$ | $< 1,0$ | $< 1,0$ | Капитальный ремонт, реконструкция |

Решение о капитальном ремонте или реконструкции моста может быть принято при значении хотя бы одного показателя эксплуатационного состояния, соответствующего IV категории неисправностей.

Составление заключения о техническом состоянии сооружений.

Среди перечисленных разделов заключения ключевым является вопрос о несущей способности конструкций сооружений. Ответ на него получают в результате проведения проверочного расчета несущей способности оснований и конструкций объекта, используя результаты данных обследования. При более глубоком обследовании целесообразно составлять паспорт технического состояния несущих конструкций сооружения. В нем представляются схемы планов и разрезов сооружения, типы основных несущих конструкций, их техническое состояние и фактическая надежность, имеющиеся дефекты и повреждения и рекомендации по усилению или профилактике конструкций. В паспорте также указывается организация, проводившая обследование, дата обследования и рекомендуемые сроки восстановления конструкций и последующего обследования [19, 23].

Для окончательной оценки пригодности сооружений перерасчет выполняется в соответствии с существующей на момент обследования методикой расчета по предельным состояниям. В результате такого перерасчета определяются завышенные внутренние усилия, деформации и перемещения конструкции в предположении сочетания неблагоприятных отклонений исходных параметров. Результаты расчета необходимы также для сравнения с данными проводимых впоследствии испытаний, то есть исходные параметры и уточненная методика ориентированы на ожидаемый в эксперименте результат. Перерасчет проводится по средним фактическим характеристикам с построением доверительных интервалов и соответствующих вероятностей. В расчет закладываются фактические параметры геометрии конструктивных элементов, нагрузок и реальные физико-механические характеристики материалов [14].

Заключение о состоянии конструкций представляет собой краткий отчет,

в котором должны быть отражены результаты по всем видам работ обследования. Если обследованная конструкция относится к сооружениям, для которых существует нормативно-техническая документация, то заключение о состоянии конструкции и рекомендации по усилению могут быть построены на основе результатов сравнения параметров характерных дефектов конструкций с признаками износа для этих конструкций [14].

Итоговым документом обследования является акт, в котором дается окончательная оценка проектного решения, качества заводского изготовления строительных деталей, строительного-монтажных работ, соответствия условий эксплуатации конструкций сооружения техническим требованиям. На основании результатов перерасчета в акте дается заключение о возможности дальнейшей эксплуатации сооружения или необходимости усиления конструкций. Заключение о техническом состоянии сооружений служит основой для предварительного решения о целесообразности реконструкции строительной части объекта.

II. 2. Технология и концепция механизированного ремонта железобетонных мостов пораженных коррозией

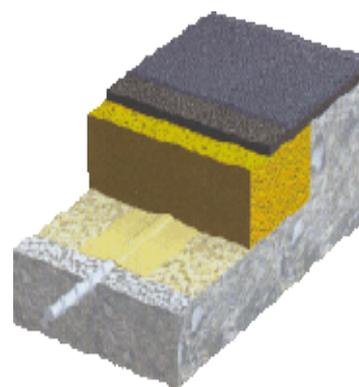
В ходе обследования и диагностики сооружений из железобетона, выявляются первичные причины его повреждений, после чего определяются необходимые системы ремонта и защиты. Основные задачи ремонта заключаются в следующем: удаление слоя дефектного бетона и вскрытие прокорродировавшей арматуры; антикоррозионная защита арматуры; обеспечение адгезии между "старым" и "новым" бетоном; закрытие пор и защита от воздействий окружающей среды [33]. Выбор способа ремонта зависит от: вида и состояния конструкции; действующих нагрузок и эксплуатационной среды.

Таблица 2.3

Выбор ручного или механизированного способа нанесения материалов

| Условия | Рекомендуемый способ | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------|
| | механизированное нанесение | нанесение вручную |
| объем ремонта | | |
| потенциальный дневной объем работ превышает производительность бригады из 4-х человек при нанесении материалов вручную | V | |
| параметры ремонта | | |
| необходимость нанесения "толстого" ремонта слоя или ремонт потолочных поверхностей | V | |
| отдельные и небольшие ремонтируемые участки | | V |
| защита окружающей среды от пыли и шума | | V |
| ремонт конструкций под динамической нагрузкой | V | |
| высокая плотность ремонтного слоя | V | |
| высокая начальная прочность ("сухое" торкрет-м) | V | |
| укладка и уплотнение бетона за вскрытой арматурой | V | |
| высокая адгезия нанесенных слоев к "старому" бетону | V | |

- предполагаемого срока эксплуатации;
- возможностей обслуживания конструкции;
- сроков проведения ремонта и экологических требований;
- требований к внешнему виду;
- стоимости работ;



Преимущества механизированного нанесения проявляются: в результате торкретирования получается ремонтный слой с большей механической прочностью, морозостойкостью, водонепроницаемостью и высокой адгезией

к подложке (основанию); высокая производительность и низкая себестоимость работ.



Рис 2.1, а. Ручное нанесение



Рис 2.1, б. Механизированное нанесение

Например, при проблемах воздействия солей для оттаивания, динамических нагрузок в виде разрушение бетона, недостаточная толщина защитного слоя, коррозия арматуры можно защитить арматуры антикоррозионного состава на цементной основе ремонта торкретбетоном [40]. При "мокрое" торкретировании необходимо нанесение специального клеящего слоя, который обеспечивает высокую адгезию ремонтного слоя к "старому" бетону основы. В качестве клеящего слоя используют полимерные и цементно-полимерные композиции. При "сухом" торкретировании, в начальной фазе нанесения, от твердой поверхности основания отскакивает почти весь заполнитель, а тонкодисперсное цементное молоко с добавками прилипает, образуя необходимый клеящий слой, на который наносятся последующие полноценные слои торкретбетона. Клеящий слой для материалов, наносимых сухим способом, рекомендуется использовать на сильно адсорбирующих основаниях, которые вытягивают из бетона воду, необходимую для нормального твердения. Обеспечение ухода за твердеющим бетоном. Для ремонтных составов, как и для всех гидравлических вяжущих систем, необходимо обеспечить нормальные температурно-влажностные условия твердения. Их соблюдение особенно важно для смесей с низким водоцементным соотношением (В/Ц), где воды для гидратации цемента может оказаться недостаточно.



Рис. 2.2. Использование систем механизированного ремонта бетона



Рис.2.3. Мокрый способ торкретирования

Номограмма показывает количество воды, испаряемой с поверхности в случае отсутствия мероприятий по уходу за бетоном (рис. 2.3). Готовая бетонная смесь подается насосом по шлангу в сопло к месту укладки. В сопло же подводится сжатый воздух, который, придавая ускорение бетонной смеси, увлекает ее на подложку. При соударении с подложкой происходит уплотнение бетонной смеси (рис.2.4).

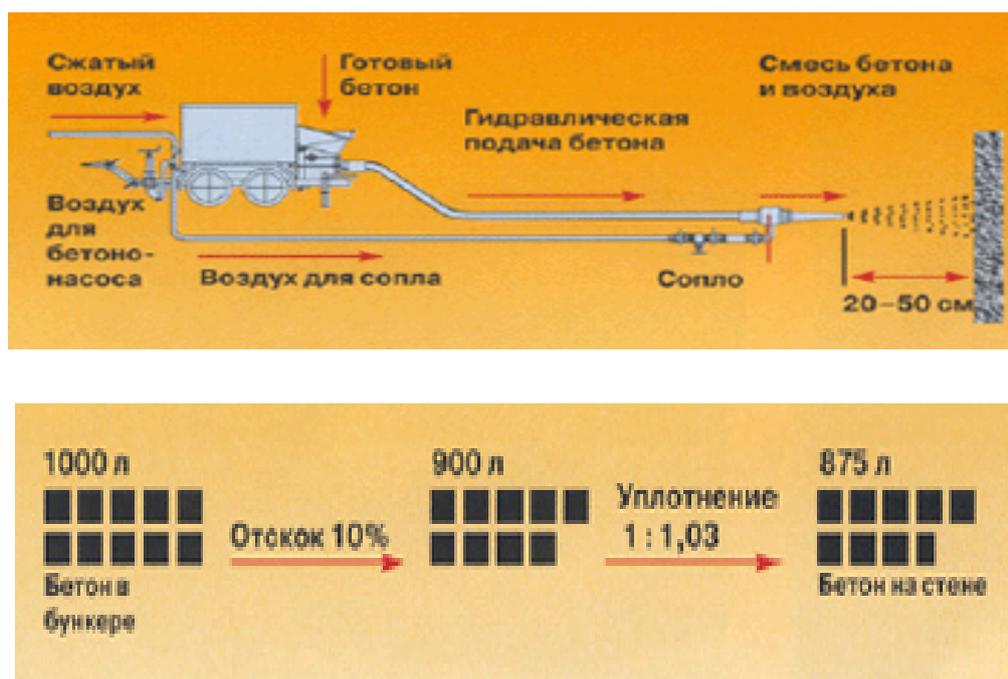


Рис 2.4. Схема мокрого способа торкретирования

Преимущества этого способа заключается в следующем: пониженное пылеобразование; однородный состав бетона; возможность окончательной затирки; возможность работы в стесненных условиях; минимальный "отскок"; минимальные затраты на защиту рабочей площадки с экологической точки зрения; приготовленный для торкретирования бетон может применяться для нанесения вручную. Это подходит для большинства типов ремонта бетона, в частности ремонта в ограниченных пространствах

Преимущества сухого способа торкретирования (рис.2.5) заключается в следующем: не требуется предварительное затворение водой; возможность подачи материала на большие расстояния; возможность нанесения "толстого" слоя за один проход; высокая производительность; не требуется грунтовка основания "клеящим" составом; высокая надежность и длительный срок эксплуатации оборудования (продувка воздухом); редкое засорение шлангов и оборудования; возможность работы в режиме "стартстоп".



Рис.2.5. Сухой способ торкретирования

Сухая бетонная смесь (заполнитель, цемент, порошкообразные добавки) загружается в бункер, сжатым воздухом в разряженном потоке подается в сопло. В основании сопла материал смешивается с водой или водным раствором добавок и увлекается воздухом на подложку. При соударении с подложкой происходит уплотнение бетонной смеси. На рис. 2.7-2.9 приведены оборудования для механизированного нанесения торкретных смесей при проведении ремонтных работ.

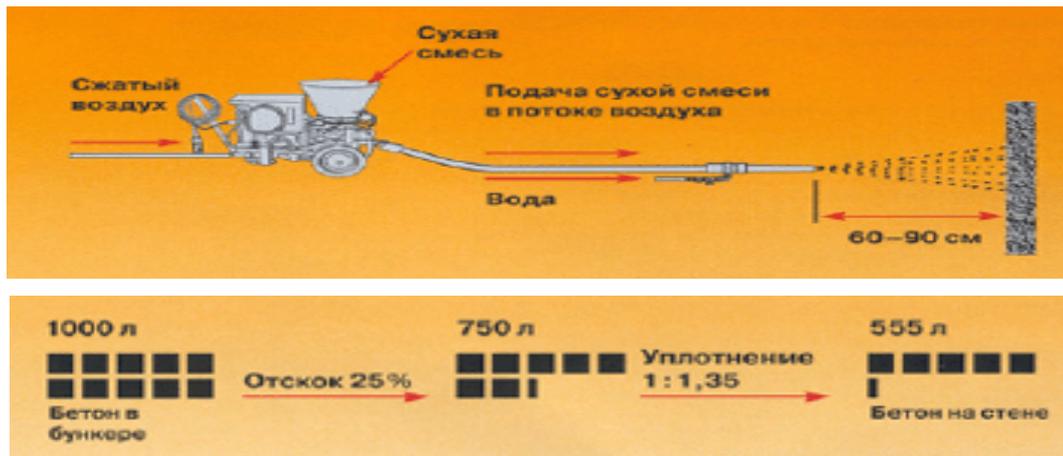


Рис 2.6. Схема мокрого способа торкретирования



Рис. 2.7. Оборудование для механизированного нанесения. Бункер-пистолет и его распыляющее оборудование
процесс: "сухое" торкретирование емкость бункера: 6 л, - вес (пустого): 1,5 кг, потребление воздуха: 220 л/мин, требуемое возд. давл.: 2-3 бар, имеется регулируемый диаметр сопла

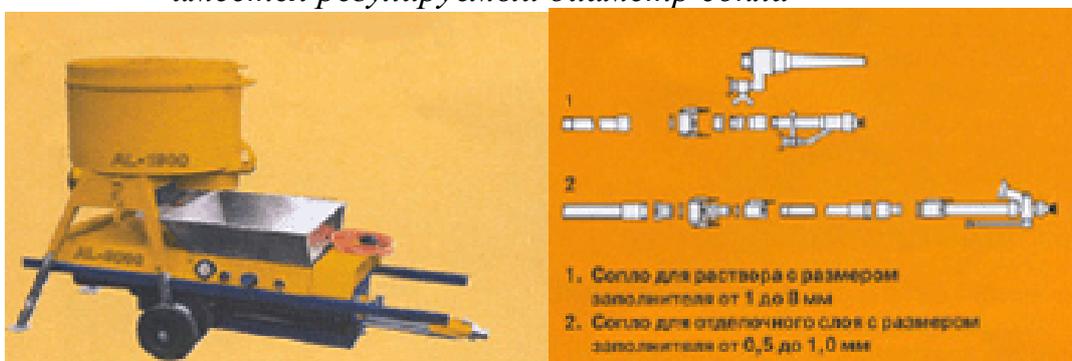


Рис. 2.8. Aliva AL-2000 со смесителем AL-1900 и распыляющее оборудование
процесс: "мокрое" торкретирование, - производительность: 0,3-2,4 куб.м/ч, расстояние подачи по горизонтали: до 70 м, давление насоса: макс. 30 бар, размеры: (мм) 1900x620x620, двигатель: 380 В/50 Гц, объем бака: 100 л



Рис. 2.9. Универсальная машина для "сухого" торкретирования, Avila AL-246.2
процесс: "сухое" торкретирование, производительность: 2 л ротор -> 0,5 куб.м/ч, 16 л ротор -> 8,4 куб.м/ч, расстояние подачи: по горизонтали до

300 м, по вертикали до 100 м, размеры: (мм) 1700x800x1450, - двигатель: 400 V/50 Hz/4.4 KB, потребность сжатого воздуха: 3-9 куб.м/ч

С первых дней эксплуатации элементы железобетонных конструкции постепенно снижают свои качества. Эти изменения происходят под воздействием многих физико-механических и химических факторов.

В особенности это относится к железобетонным сооружениям, подверженным коррозии арматуры. Коррозия арматуры может привести к заметному снижению прочности, и даже к полному разрушению железобетонных конструкций [33, 40].

Для предотвращения аварий и повреждений конструкций сооружений в техническом аспекте состоит в заблаговременном их усилении при появлении неисправностей. В состав основных ремонтно-восстановительных работ включается: восстановление (ремонт) - придание конструктивным элементам первоначальных качеств и характеристик; усиление - придание конструкциям качеств и характеристик повышенных (улучшенных) по сравнению с первоначальными; замена конструкций новыми. Основные принципы ремонта и усиления конструкций могут быть сформулированы в виде нижеследующих пунктов:

1. Виды и методы ремонта и усиления элементов зданий и сооружений зависит от обеспечения требуемого уровня эксплуатационной надежности, которое включает возможные изменения объемно-планировочных решений, нагрузок и условий эксплуатации.

2. При выборе оптимального способа ремонта и усиления конструкций важно установить действительный характер их работы, фактически действующие нагрузки.

3. Определенным резервом снижения материалоемкости и трудозатрат при реконструкции является учет прочностных характеристик бетона и стали при выполнении поверочных расчетов.

4. При усилении следует отдавать предпочтение индустриальным способам, которые не требуют разгрузки конструкций, методам, связанным с изменением статической схемы конструкций, использованию предварительного напряжения, высокопрочным сталям.

5. Усиление конструкций предварительным напряжением следует производить, применяя такие конструктивные решения и методы производства работ, при которых соблюдается плавное включение элементов усиления в работу с существующими конструкциями.

6. Усиление и восстановление строительных и, в частности, железобетонных конструкций является, как правило, трудоемким и дорогостоящим процессом, поэтому принятию решения по усилению и восстановлению должен предшествовать тщательный анализ возможности использования существующих конструкций в новых условиях эксплуатации.

7. При выборе вариантов усиления следует отдавать предпочтение решениям с четкой расчетной схемой, обеспечивающей совместную работу усиливаемой конструкции с элементами усиления.

8. Проект ремонта, усиления или реконструкции разрабатывается с учетом многих исходных данных.

9. Усиление конструкций может осуществляться по двум схемам: возведение новых разгружающих или заменяющих конструкций, которые полностью или частично воспринимают дополнительные нагрузки; увеличение несущей способности существующих конструкций.

10. Для элементов усиления без предварительного напряжения рекомендуется применять рабочую арматуру классов А-I, А-II, А-III; для предварительно напряженных конструкций усиления (шпренгелей, за-

тяжек) - А-IIIв, А-IV, А-V, А-VI, арматурные канаты классов К-7 и К-19 и др.

11. Расчет железобетонных конструкций усиления выполняется с учетом фактических характеристик прочности и армирования материалов.

12. Расчет конструкций усиления производится по первой и второй группам предельных состояний.

13. При повреждении площади сечений элементов или арматуры более чем на 50 % несущая способность существующей конструкции в расчетах не учитывается.

14. Как и в обычных конструкциях, расчет прочности усиленных элементов производится для сечений нормальных и наклонных к продольной оси элемента, а также на местное действие нагрузки, вызывающее смятие, продавливание, отрыв.

15. При применении комплексного усиления (бетон - металл) следует учитывать в расчетах податливость узлов сопряжения.

Выбор способа ремонта (технология, материал) зависит от характера дефектов, которые по влиянию на конструкцию могут быть разделены на три группы:

- не снижающие прочности и долговечности конструкции (мелкие поверхностные раковины, трещины раскрытием не свыше 0,2 мм, сколы бетона без оголения арматуры и т. п.);

- снижающие долговечность конструкции (трещины раскрытием более 0,2 мм, раковины и сколы с оголением арматуры, поверхностная и глубинная коррозия бетона и т. д.);

- снижающие несущую способность конструкции (наклонные трещины в стенках балок, горизонтальные трещины в сопряжении плиты и стенки пролетных строений, раковины и пустоты в бетоне и др.).

Способы усиления пролетных строений выбирают с учетом ряда обстоятельств, например состояния основных элементов, уровня усиления, условий производства работ и т. п. Усиление железобетонных пролетных строений осуществляют либо увеличением сечения их элементов, либо изменением системы. Существуют традиционные методы усиления железобетонных пролетных строений и нетрадиционный метод.

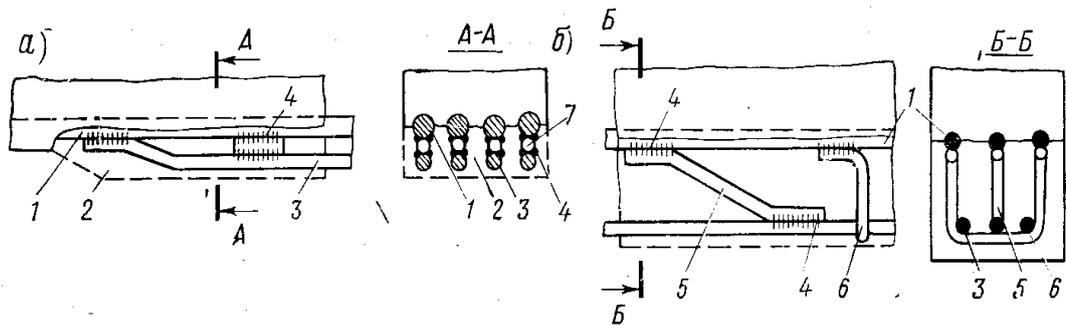
В традиционном методе усиления железобетонных пролетных строений добиваются путём :

- увеличения рабочего сечения балок;
- увеличением высоты балок;
- увеличением толщины стенок и сечения нижнего пояса;
- натяжением шпренгелей;

При небольшом усилении (10 - 15%) увеличение рабочих сечений балок может быть обеспечено добавлением арматуры, привариваемой к стержням нижнего ряда. Для этого удаляют защитный бетонный слой до половины стержней нижнего ряда и к ним приваривают добавляемые стержни через коротыши длиной 10 - 20 см (рис. 2.10, а), после чего бетон нижнего пояса восстанавливают торкретированием. В этом случае высота балки почти не увеличивается, а грузоподъемность ее повышается за счет добавляемой арматуры, которая, как это понятно, будет работать на усилия от временной нагрузки.

Более существенного повышения грузоподъемности пролетного строения (15 - 35%) достигают увеличением высоты балок (до 20 см) и площади рабочей арматуры приваркой каркаса (рис. 2.10,б), состоящего из

продольных, наклонных стержней и коротких хомутов. Добавляемую арматуру после удаления защитного слоя приваривают к существующей посредством наклонных коротышей. Хомуты, объемлющие добавляемую арматуру, верхними концами также приваривают. При этих работах во



а - с приваркой стержней через коротыши; б - с приваркой каркаса; 1 – существующая арматура; 2 – зона усиления; 3 - арматура усиления; 4 - сварка; 5 - наклонный коротыш; 6 - прямой хомут; 7 – коротыш.

Рис. 2.10. Усиление железобетонных балок путем постановки дополнительной арматуры

В нетрадиционном методе для усиления железобетонных конструктивных элементов применяют композитные материалы. Система приклеиваемых композитных мате-



риалов из углеродных волокон можно применять для увеличения несущей способности железобетонных мостов. Основные составляющие системы - клей, ленты и ремонтный раствор. Дополнением к системе являются угольники для усиления зон сжатия, а также холсты из углеродных волокон, используемые везде, где применение углеродных лент затруднено или невозможно. При небольших размерах и собственном весе ленты обнаруживают высокую прочность не только на растяжение, но и на усталость материала. При этом различные продукты этой линии

обладают различными модулями упругости, что позволяет оптимально подбирать ленты для усиления конструкций в зависимости от характера их работы. Материал абсолютно водонепроницаем, устойчив к коррозии. Есть возможность предварительного напряжения лент непосредственно перед наклеиванием их на конструкцию, а также покрытия их растворами и красками. В 1987 г. в Швейцарском институте строительных материалов (EMPA) начались испытания различных строительных конструкций. Железобетонные балки были подвергнуты воздействию статических и динамических нагрузок в экстремальных погодных условиях. Было зафиксировано появление льда в микротрещинах, но снижения несущей способности не наблюдалось. В 1991 г. началось практическое применение системы Sika CarboDur при усилении железобетонных конструкций материалами из углеродных волокон с высоким модулем упругости снижаются напряжения в арматурной стали, и уменьшается ширина раскрытия трещин. Еще более впечатляющих результатов удастся добиваться, предварительно напрягая ленты.



Угольники Sika CarboShear L (L-образные элементы) играют роль своего рода внешних хомутов, наклеиваемых на тавровые балки и ребристые плиты.

Угольники анкерятся в сжатых зонах полок сечений (для чего сверлятся специальные отверстия) и приклеиваются клеем Sikadur 30 к боковым и нижним поверхностям изгибаемых конструкций. Для проведения испытаний угольников была специально изготовлена тавровая балка со стенкой без



хомутов. Вместо них она была армирована угольниками. Результаты тензометрических испытаний свидетельствуют о том, что на изгиб такая балка работает точно так же, как тавровая балка, конструктивно армированная обычным образом. Холсты из углеродных волокон SikaWrap широко применяются в зонах растяжения конструкций, а также там, где конструкции работают на срез. Усиленные SikaWrap конструкции проявляют высокую устойчивость к динамическим, в частности, тектоническим нагрузкам. Есть возможность наклеивания этих холстов в три слоя, при этом образуется привлекательного внешнего вида тонкий слой с возможностью нанесения цветного защитного слоя. Как и лентам CarboDur, холстам SikaWrap/8,11,33,40/.

Достоинства применения систем из холстов из углеродных волокон:

- возможность применения в зонах проявления напряжений на растяжение и на срез;

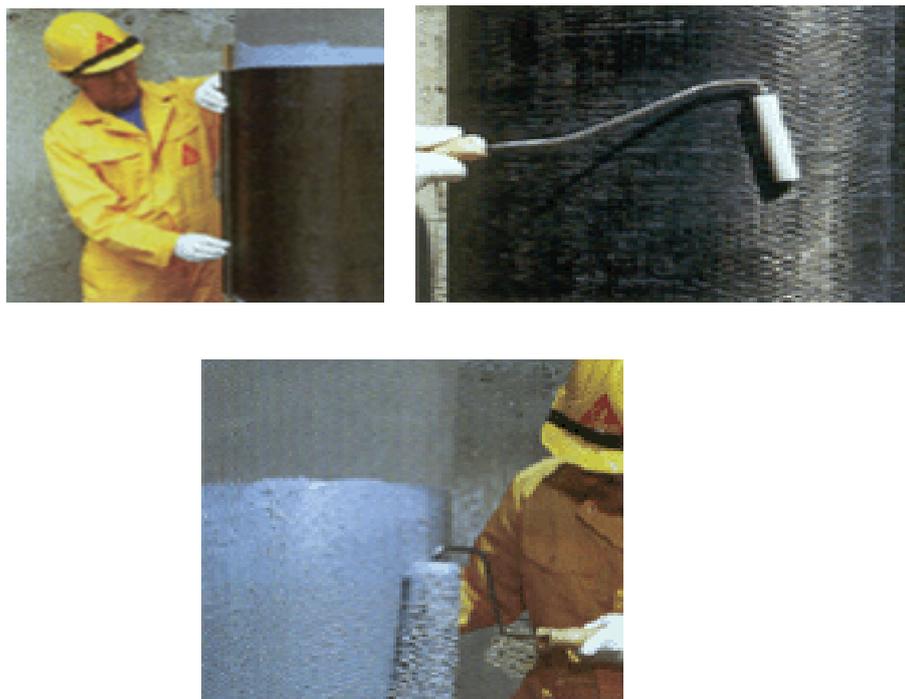


Рис.2.11 Укладка холста

- возможность усиления элементов со сложной геометрией (опоры мостов), высокая устойчивость к динамическим нагрузкам (например ударам, землетрясениям) и к тектоническим явлениям (разломам, обвалам);

- небольшой собственный вес и экстремально высокая прочность на усталость и удобство и простота в применении, возможность нанесения в три слоя, образует тонкий, эстетического вида слой, возможность нанесения цветных защитных слоев.

Закончить аппликацию путем нанесения последнего слоя клеевой раствора Sikadur 330 - лучше всего используя валик или кисточку. В случае применения очередного слоя усиления необходимо вышеуказанные операции повторить (рис.2.12). Следует указать преимущества защиты арматуры системой Sika Ferrogard: продление срока эксплуатации конструкций, подверженных коррозии или находящихся в начальной стадии коррозии; существенное торможение процесса коррозии арматуры; в новых конструкциях отодвигается время начала коррозии;

создание защитного покрытия непосредственно на поверхности арматурных стержней; простота применения.

Пример. Во время ремонта виадука оказалось, что альтернативой для устранения карбонизированного бетона в 70 летней конструкции является применение мигрирующих ингибиторов коррозии. Использование системы Sika Ferrogard вместе с покрытием Sikagard обеспечило качественную защиту арматурной стали.

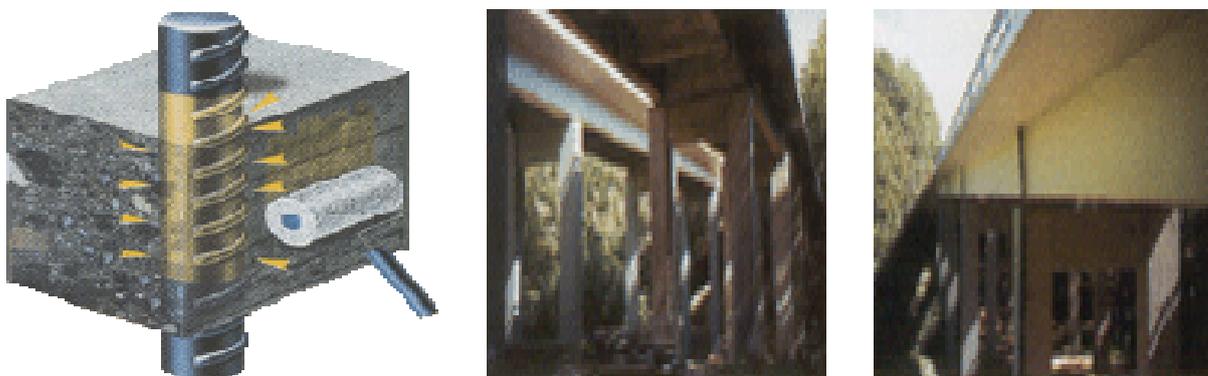


Рис.2.12. Применение мигрирующих ингибиторов коррозии

При этом пропиточный материал для бетона, содержащий мигрирующие ингибиторы коррозии, тормозящие процессы коррозии арматурной стали. Добавку к бетону, содержащая мигрирующие ингибиторы коррозии предназначена в основном, для тонкостенных, густо армированных строительных элементов (напр. опорные стены) [40].





Рис.2.13. Восстановление поврежденных участков



Рис. 2.14. Нанесение гидроизоляционного покрытия

Процесс ремонта дефектных участков можно произвести гидроизоляция современными материалами, как показаны на рис. 2.13-2.14 и состоит из следующих этапов:

1. Подготовка к выполнению работ;
2. Механическое удаление участков "слабого" бетона;
3. Механическая очистка арматуры от следов коррозии;
4. Обработка поверхности арматуры.
5. Нанесение антикоррозионного состава на цементной основе $1,6 \text{ кг/м}^2$;
6. Нанесение гидроизоляционного покрытия слоем толщиной от 2 до 5 мм.

Защита поверхности железобетонных конструкций требуется прежде всего в тех случаях, когда окружающая среда разрушающее 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 [33, 40].

Основные достоинства использования жестких защитных покрытий:

- защита бетона от воздействия агрессивной среды;
- паропроницаемость;
- пропитка свежесушеного бетона;
- сопротивление процессам старения;
- наблюдение за образованием трещин в аварийных состояниях предварительно напряженных конструкций;
- обновление устаревших покрытий; - высокие эстетические качества.

II.3. Приборы и аппаратуры для диагностики скрытых дефектов и повреждений железобетонных мостов

Коррозия арматуры может привести к снижению несущей способности конструкции в целом. В связи с этим при обследовании необходимо определить участки коррозии арматуры в железобетоне также характер, вид, степень и глубину коррозионных повреждений. В процессе обследований необходимо установить степень и вид поражения металла коррозией: сплошная или местная, равномерная, неравномерная и язвенная. Степень поражения материалов равномерной коррозией определяется сравнением поперечных сечений пораженных участков с проектными. При местной и язвенной коррозии устанавливают размеры локализованных поражений и их количество на единицу площади. Коррозия арматуры обнаруживается визуально по появлению продольных трещин и ржавых пятен на поверхности защитного слоя бетона, а также приборами неразрушающего контроля.

Приборы неразрушающего контроля широко используются для контроля и обеспечения качественного технологического процесса в целом ряде отраслей народного хозяйства: металлургии, машиностроении, химической промышленности и т.п. В строительстве неразрушающие методы применяются главным образом для контроля сварных металлоконструкций, при изготовлении железобетонных деталей и элементов и т. д. и при освидетельствовании сооружений. Они являются также весьма перспективными для контроля качества строительных конструкций на заводах (в первую очередь заводах ЖБИ) не только для выявления уже допущенных дефектов и отступления от требований стандартов, но и, прежде всего, для предупреждения самой возможности таких нарушений. По физическим принципам различают следующие основные методы неразрушающих исследований:

- 1) при помощи проникающих сред (жидких, газообразных и др.)
- 2) механические методы испытаний;
- 3) акустические (ультразвуковые и более низких частот);

4) магнитные, электромагнитные и электрические;

5) при помощи ионизирующих излучений (рентгеновские, радиоизотопные и др.);

б) радиодефектоскопия и инфракрасная дефектоскопия.

Для выявления различных скрытых дефектов вызванной коррозией арматуры виде трещин; расслоениями; выщелачивания и размораживания бетона, определяется такими методами как: акустические; магнитные, электромагнитные и электрические; при помощи ионизирующих излучений; радиодефектоскопия и инфракрасная дефектоскопия/8,11,33,40/.

Акустические методы основаны на возбуждении упругих механических колебаний. В зависимости от частоты колебаний акустические методы делятся на ультразвуковые (от 20 тыс. Гц и выше) и методы, основанные на использовании колебаний звуковой (до 20 тыс. Гц) и инфразвуковой (до 20 Гц) частот.

Ультразвуковые методы. Для возбуждения ультразвуковых волн на поверхности исследуемого материала устанавливают преобразователи переменного электрического тока, создающие колебания. Чаще всего применяются преобразователи, действующие по принципу пьезоэффекта. На рис. 2.15 показан график распространения колебаний по толщине стенки.

Дойдя до противоположной ее грани, волна отражается и идет в обратном направлении.

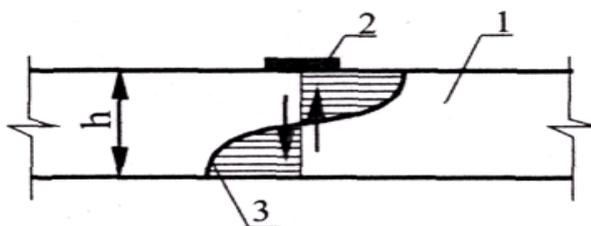


Рис. 2.15. Схема измерения толщины резонансным методом: 1 - исследуемая деталь; 2 – пьезоэлемент; 3 - совпадающие амплитуды прямой и обратной «стоячей» волны; h - толщина детали

Излучающий и приемный преобразователи А и В располагаются симметрично относительно краев трещины на расстоянии a друг от друга

(рис. 2.16). Колебания, возбужденные в точке А, попадут в точку В по кратчайшему пути: $ACB = \sqrt{4h^2 + a^2}$, где а - глубина трещины.

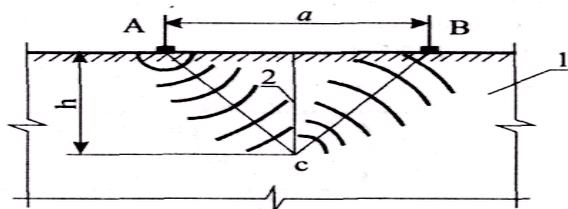


Рис. 2.16. Определение глубины поверхностной трещины в бетоне: 1 - бетонный массив; 2 - трещина; А - излучающий и В - приемный преобразователи

Вибрационный метод. Данный метод основан на использовании колебаний звуковой частоты и применяется при испытаниях образцов бетона (рис. 2.17). Рассматриваемый метод полезен для получения быстрой и надежной информации о ходе технологического процесса и может также быть положен в основу автоматического управления.

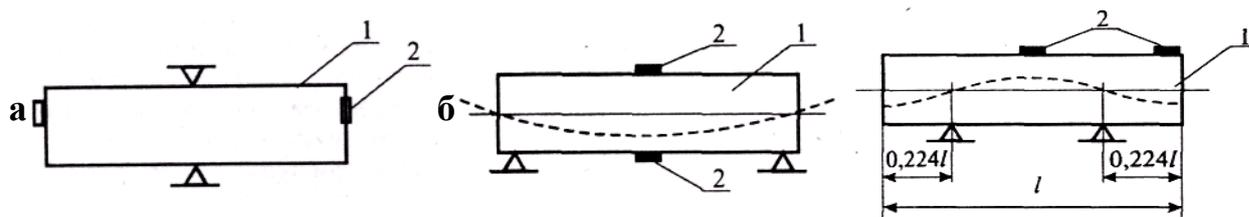


Рис. 2.17. Испытание образцов бетона резонансным методом: а - возбуждение продольных; б и в - изгибных колебаний; 1 - испытуемый образец; 2 - пьезопреобразователи

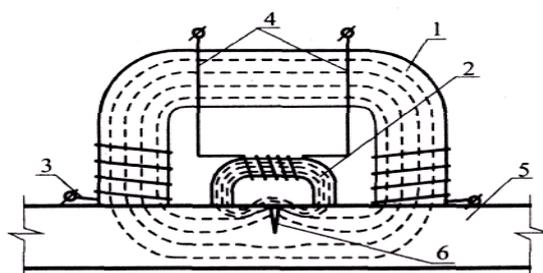


Рис. 2.18. Схема дефектоскопа К. Х. Хренова и С. Т. Назарова: 1 - электромагнит; 2 – электро-магнитный датчик; 3 - проводка к сети переменного тока; 4 - то же, к усилителю; 5 – про-веряемый элемент; 6 - дефект

Магнитные, электрические и электромагнитные методы. Сущность метода заключается в том, что магнитный поток, проходящий в металле и пересекающий трещину или иной дефект, встречает большое магнитное

сопротивление в виде прослойки воздуха или неферромагнитного включения, а силовые линии, искривляясь, выходят на поверхность, что обуславливает возникновение местных потоков.

В качестве примера на рис. 2.18 схематически показан принцип действия одного из наиболее известных приборов такого типа - дефектоскопа К. Х. Хренова и С. Т. Назарова. Сигналы о наличии дефекта в производственных условиях преобразуются обычно в звуковые, но могут быть использованы как показывающие так и регистрирующие приборы (измерители тока или напряжения, осциллографы и т.п.).

Приборы магнитно-индукционного типа. Для выявления положения и глубины залегания арматуры предложены магнитометрические приборы, состоящие из двух постоянных магнитов, в центральной части магнитного поля, которых расположен на оси небольшой магнит, соединенный со стрелкой-указателем. При приближении к арматуре напряженность магнитного поля в средней точке изменяется, что обуславливает возникновение магнитного момента, поворачивающего магнитик со стрелкой. Экстремум отклонения указателя соответствует расположению прибора на поверхности контролируемого изделия над осями арматурных стержней, а отклонение стрелки указывает на толщину защитного слоя бетона рис. 2.19 /8,11,33,40/.

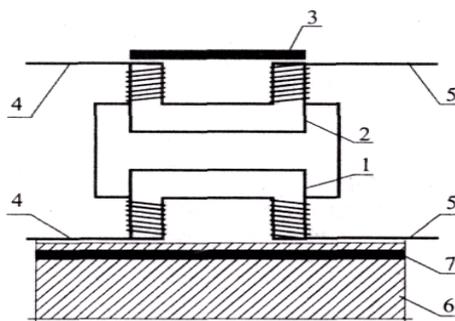


Рис. 2.19. Индукционный прибор для проверки положения и диаметра арматуры и толщины защитного слоя: 1 - выносной индуктивный преобразователь; 2 - преобразователь в корпусе прибора; 3 - стержень для регулирования индуктивного сопротивления; 4 - проводка к источнику переменного тока; 5 - проводка к измерительному устройству; 6 - железобетонный элемент; 7 - арматурный стержень

Приборы неразрушающего контроля нового поколения. В последние годы в странах СНГ (особенно в России) создан целый комплекс малогабаритных электронных приборов неразрушающего контроля и неразрушающей дефектоскопии, [11, 33, 40], которые позволяют:

- *определять* влажность, температуру и коэффициент теплопроводности различных материалов, из которых изготовлены строительные конструкции;

- *выявлять* наличие микротрещин, выходящих на поверхность металлоконструкций, ферромагнитных деталей и сварных швов;

- *косвенно контролировать* прочность бетона, толщину защитного слоя и диаметр арматуры в железобетонных конструкциях.

Технические параметры и область применения некоторых из указанных приборов более детально представлены ниже.

Прибор позволяет определять прочность бетона (ГОСТ 17624) и кирпича (ГОСТ 24332), выявлять дефекты (трещины, пустоты), оценивать несущую способность ж/б конструкций, пористость и трещиноватость горных пород, степень анизотропии и текстуру композитных материалов.

В России разработкой и производством электронных приборов нового поколения успешно занимается НПО "Карат", СКВ "Стройприбор, ООО НПП Интерприбор и др. Все выпускаемые приборы сертифицированы Госстандартом России и широко используются как внутри страны, так и за рубежом. Созданные приборы обладают большим набором сервисных функций и универсальностью, имеют легкие и удобные датчики нестандартной конструкции. Они оснащены автономной 9-клавишной клавиатурой и графическим дисплеем с подсветкой, обеспечивают высокий уровень информативности, легко адаптируются к условиям пользователя. *Высокая достоверность* измерений обеспечивается специальной интеллектуальной обработкой собранной информации с учетом ряда технических, эргономических и технологических факторов. Все приборы имеют автономный высокоскоростной процессор и электронную записную книжку для хранения информации, собранной в полевых условиях. Одновременно

созданные приборы оснащены интерфейсами и имеют инфракрасную связь с компьютером, позволяющую сбрасывать всю информацию, накопленную в полевых условиях, в память персонального компьютера. Разработанные приборы оснащены специальными компьютерными программами для считывания памяти приборов, хранения и документирования полученных результатов измерений.

Технические параметры и область применения некоторых из указанных приборов более детально представлены ниже [32, 34, 39].

1. Прибор **ВИСТ–2.4** для измерения параметров виброколебаний и натяжения арматуры. Предназначен для измерения среднеквадратического значения виброскорости, амплитуды и частоты колебаний виброустановок, используемых для уплотнения бетонной смеси при изготовлении железобетонных изделий, а также для измерения параметров вибрации других объектов (машин, механизмов, фундаментов). Применим для балансировки вентиляторов.



2. Прибор **ОНИКС – 2.5** для контроля прочности, плотности и однородности материалов. Прибор предназначен для контроля прочности бетона на сжатие неразрушающим ударно-импульсным методом (ГОСТ 22690–88) при технологическом контроле качества, обследовании зданий, сооружений и конструкций. Применим для контроля прочности кирпича, прочности и однородности композиционных материалов, растворных швов, штукатурки и т.п.



3. Прибор **ПУЛЬСАР–1.0/1.1** для контроля прочности, плотности и однородности материалов. Предназначен для измерения времени и скорости распространения УЗ колебаний в твердых материалах при сквозном и поверхностном прозвучивании. Прибор позволяет определять прочность бетона и кирпича, выявлять дефекты (трещины, пустоты), оценивать несущую способность железобетонных конструкций, пористость и трещиноватость горных пород, степень анизотропии и текстуру композитных материалов.



4. Прибор **ВИБРАН–2.0** для измерения параметров виброколебаний и натяжения арматуры. Малогабаритный прибор, предназначенный для вибродиагностики конструкций, фундаментов, оснований, мостовых сооружений, строительных изделий, абразивов, вибрационного оборудования, двигателей, турбин, вентиляторов, в частности, для анализа реакции конструкций на ударное воздействие.



5. Прибор **ВИБРАН–3.0** для измерения параметров виброколебаний и натяжения арматуры. Предназначен для многоканальной вибродиагностики конструкций, фундаментов, оснований, мостовых сооружений, строительных изделий, вибрационного оборудования, компрессорных станций, двигателей, турбин, и т.п., а также для анализа реакции конструкций на ударное воздействие. Применим для поиска дефектов структуры различных объектов методом сопоставления их реакций с эталонным спектром, в частности при разбраковке керамических и абразивных изделий.



6. Прибор **ИНК–2.4 / 2.4К** для измерения параметров виброколебаний и натяжения арматуры. Назначение прибора – измерение частотным методом механических напряжений в элементах стержневой, проволочной и прядевой арматуры железобетонных изделий и конструкций, а также параметров виброколебаний (частота, виброскорость и виброперемещение) различных объектов.



7. Прибор **ВИСТ–2.4** для измерения параметров виброколебаний и натяжения арматуры. Предназначен для измерения среднеквадратического значения виброскорости, амплитуды и частоты колебаний виброустановок, используемых для уплотнения бетонной смеси при изготовлении железобетонных изделий, а также для измерения параметров вибрации других объектов (машин, механизмов, фундаментов). Прибор фиксирует 600 результатов измерений (виброскорость, виброперемещение, коэффициент гармоник, частоту), дату и время измерений, имеет возможность выбора объекта контроля (виброплощадка, фундамент, вентилятор, двигатель), режима индикации измерений и программно переключаемый диапазон измерений.



8. Прибор **ВИМС – 2.2** для контроля влажности материалов. Серия измерителей влажности материалов ВИМС–2 предназначена для измерения влажности широкой номенклатуры строительных материалов по ГОСТ 21718 (песка, бетона, кирпича) и древесины по ГОСТ 16588 (сосны, ели, лиственницы, березы, дуба, бука, осины, липы и др.), в том числе в изделиях и



конструкциях. Основной областью применения приборов являются различные виды строительного производства и технологий, в которых влажность материалов регламентируется нормативно-технической или технологической документацией.

9. Прибор **ПОИСК-2.4**. Применение новых технических решений и алгоритмов математической обработки информации позволило существенно повысить достоверность измерений. Условия измерений выбираются пользователем с помощью экранного меню. Основные функции: автоматический цикл измерений; автоматическая регистрация результатов и условий измерений; диалоговый режим работы пользователя с прибором через систему меню; полноценное отображение результатов на графическом дисплее с подсветкой; язык текстовых сообщений – русский, английский.



10. Прибор **ТЕМП-3**: Термометры – Гигрометры – Регистраторы. Семейство приборов ТЕМП-3 разработано для измерения и регистрации влажности неагрессивных воздушных сред и температуры жидких, газообразных сред, сыпучих материалов, битума, поверхностей твердых материалов и других применений. Выпускаются в нескольких модификациях с различным исполнением датчиков, в зависимости от назначения, конструкции, условий эксплуатации, инерционности и температурного диапазона.



11. Прибор **ОНИКС** – для контроля прочности, плотности и однородности материалов. Предназначен для определения прочности бетона методом отрыва со скалыванием по ГОСТ 22690–88.



12. Прибор **ВИМС–2.1** для контроля влажности материалов. Серия измерителей ВИМС–2.1 предназначена для измерения влажности широкой номенклатуры твёрдых материалов: бетона, древесины (16 различных пород: берёза, бук, дуб, ель, кедр, клён, липа, лиственница, ольха, орех, осина, пихта, сосна, тополь, яблоня, ясень), цементной стяжки и других материалов (9 свободно программируемых материалов).



13. Прибор **ИПС–МГ4.01** для измерения прочности бетона (метод ударного импульса по ГОСТ 22690). Прибор ИПС–МГ4.01 предназначен для оперативного неразрушающего контроля прочности и однородности бетона и раствора методом ударного импульса по ГОСТ 22690. Область применения прибора – определение прочности бетона, раствора на предприятиях стройиндустрии и объектах строительства, а также при обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений.



14. Микроскоп измерительный **МПБ – 3М** (для определения ширины раскрытия трещин на поверхности бетона). Микроскоп предназначен для рассмотрения с увеличением 25 крат и 50 крат различных предметов и измерения их линейных размеров в отраженном и проходящем свете. Микроскоп может быть использован в различных областях промышленности, науки и образования с целью: испытаний материалов (твердость, износ); контроля печатных плат; проведения экспертиз; изучения и измерения микрообъектов бесконтактным способом; определения ширины раскрытия трещин на поверхности бетона при обследовании зданий и сооружений.



15. Приборы **ИТС – 1**: измерители теплопроводности материалов. Измеритель теплопроводности ИТС-1 предназначен для измерения теплопроводности и термического сопротивления широкого спектра строительных и теплоизоляционных материалов стационарным методом в соответствии с ГОСТ 7076–99.



16. Приборы **ПОС-30МГ4** и **ПОС-50МГ4** для измерения прочности бетона (метод отрыва со скалыванием по ГОСТ 22690). Приборы предназначены для неразрушающего контроля прочности бетона методом отрыва со скалыванием. Область применения приборов – определение прочности бетона на объектах строительства, при обследовании зданий и сооружений, а также для уточнения градуировочных характеристик ударно –



импульсных и ультразвуковых приборов, в соответствии с Приложением №9 ГОСТ 22690.

17. Прибор **ЭИН–МГ4** для измерения напряжений в арматуре частотным методом. Прибор ЭИН–МГ4 предназначен для оперативного производственного контроля предварительных напряжений в стержневой, проволочной и канатной арматуре железобетонных конструкций частотным методом по ГОСТ 22362.



18. Прибор **ИПА–МГ4** для измерения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры. Прибор ИПА–МГ4 предназначен для оперативного контроля толщины защитного слоя бетона и расположения стержневой арматуры в железобетонных изделиях и конструкциях магнитным методом по ГОСТ 22904.



Выводы по главе II

Выявлено что коррозионные поражения приводят к дефектам виде трещин, отслоения бетона вдоль арматуры, выщелачивания, растрескивание и потеки на поверхности железобетонных элементов. 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.

Для ремонта на основании проведенного обзора рекомендуется следующие методы усиления традиционные, и в тех случаях когда традиционные методы неперспективны рекомендуется новые метода усиления с применением из углеродных волокон. Материал абсолютно водонепроницаем, устойчив к коррозии и есть возможность предварительно

напряжения лент непосредственно перед наклеиванием их на конструкцию. В результате усиления железобетонных конструкций материалами из углеродных волокон с высоким модулем упругости снижаются напряжения в арматурной стали, и уменьшается ширина раскрытия трещин.

Выявлено такие приборы для диагностики коррозионных дефектов:

- прибор ИПС-МГ4.01 предназначен для оперативного неразрушающего контроля прочности и однородности бетона и раствора методом ударного импульса по ГОСТ 22690;

- прибор ИПА-МГ4 предназначен для оперативного контроля толщины защитного слоя бетона, определения диаметра и расположения стержневой арматуры в железобетонных изделиях магнитным методом по ГОСТ 22904.

- прибор ПУЛЬСАР-1.0/1.1 Прибор позволяет определять прочность бетона (ГОСТ 17624), выявлять дефекты (трещины, пустоты), оценивать несущую способность ж/б конструкций, пористость и трещиноватость горных пород, степень анизотропии и текстуру композитных материалов.

III. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ТИЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ

III.1. Учет хлоридной коррозии при прогнозировании срока службы железобетонных пролетных строений

Повышение надежности и долговечности железобетонных мостов – актуальная, сложная и многофакторная проблема, комплексное решение которой возможно только на основе детального рассмотрения различных ее аспектов. Одной из наиболее существенных сторон этой проблемы является анализ коррозионных процессов в железобетонной конструкции, протекающих под влиянием окружающей среды и снижающих ее долговечность.

Эксплуатационное состояние автодорожных железобетонных мостов – важная проблема нормального функционирования инфраструктуры практически всех современных развитых государств, решаемая на государственном уровне.

Обследование более 600 городских мостов показало, что 20% из них не отвечают по своему состоянию требованиям пропуска современного транспорта, 7% признаны предаварийными, а 4% – аварийными. В той или иной степени в ремонте нуждаются 100% всех обследованных мостов.

В последние годы резко возрос интерес к прогнозированию срока службы железобетонных мостовых конструкций. Это вызвано, прежде всего, неудовлетворительным состоянием многих железобетонных мостов, которые уже после 30-40 лет эксплуатации достигают критической степени физического износа. В настоящее время имеют место два принципиальных направления исследований по вопросу коррозии в железобетонных пролетных строениях автодорожных мостов.

Первое основывается главным образом на изучении и обобщении опыта эксплуатации железобетонных мостов, анализе износа и остаточного ресурса прочности и выносливости различных конструктивных элементов, построении соответствующих теоретических и эмпирических зависимостей.

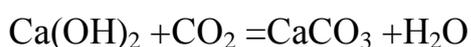
Это направление получило реализацию в работах Васильева А.И., Подвального А.М., Шестерикова В.И., Антроповой Е.А., Бондаренко В.М., Иосилевского Л.И., Чиркова В.П. и в ряде других.

Второе направление использует вероятностный подход к деградационным процессам применительно к конкретным сооружениям. Данное направление получило реализацию в работах Анисимова А.В., Шилина А.А., Зайцева М.В., Золотарева И.А., в которых анализируются с вероятностных позиций карбонизация бетона и диффузия хлоридов с учетом климатических и сезонных агрессивных воздействий на конструкции.

В подавляющем большинстве случаев главной причиной потери эксплуатационных характеристик железобетонных мостов является коррозия арматуры. В мостах и путепроводах коррозия, как правило, наступает в результате двух идущих параллельно процессов:

- а) карбонизации бетона защитного слоя;
- б) проникновения к арматуре хлоридов, чаще всего поваренной соли, которая попадает на поверхность конструкции в качестве антиобледенителя.

Карбонизация защитного слоя – самое распространенное универсальное агрессивное воздействие, которому подвергаются железобетонные конструкции, эксплуатируемые в природной среде. Существо ее заключается в том, что углекислый газ, содержащийся в атмосфере в средней объемной концентрации $C = 0,03\%$, взаимодействует с гидратом окиси кальция и едкими щелочами защитного слоя бетона. В результате значение рН жидкой фазы бетона, которое при отсутствии карбонизации находится в пределах 12,4-13,0, падает до 11,0 и более низких значений; функция защитного слоя как электрохимической защиты арматуры утрачивается, пассивное состояние стали нарушается, и арматура оказывается подверженной коррозии. Процесс такого изменения химического состава бетона и называется карбонизацией или нейтрализацией. Карбонизация представляется в виде следующей химической реакции



Ход процесса количественно строго описывается системой дифференциальных уравнений [33], упрощением которой является дифференциальное уравнение 1-го порядка, известное как 1-ый закон Фика. Его решение содержит эмпирические параметры, характеризующиеся неопределенностью и большим разбросом значений, поэтому в практических расчетах обычно используется получаемая на основании 1-го закона Фика полуэмпирическая зависимость в форме

$$X = A\sqrt{\tau},$$

где X – глубина (толщина) карбонизированного слоя (см); τ – время (годы); A – эмпирический коэффициент (см/год^{0,5}). Эта формула имеет многочисленные экспериментальные подтверждения. Коэффициент A , если речь идет о конструкциях, эксплуатируемых в природной среде, отражает совокупное влияние на скорость карбонизации состава и структуры бетона, условий эксплуатации и положения железобетонного элемента в сооружении, а также климатических и погодных факторов.

Таблица 3.1

Рекомендации по максимальному содержанию хлоридов в различных конструкциях

| № п/п | Характеристика конструкции | Класс конструкции по содержанию СГ | Максимально допустимое содержание СГ, % от массы цемента |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1 | Неармированный бетон, в котором нет также других металлических элементов | 1,0 | 1,0 |
| 2 | Бетон, армированный обычной арматурой или содержащий другие металлические элементы | 0,20 0,40 | 0,20 0,40 |
| 3 | Предварительно напряженный железобетон | 0,10 0,20 | 0,10 0,20 |

Главной причиной снижения долговечности эксплуатируемых железобетонных мостов на автомобильных дорогах является коррозия стальной арматуры вследствие массового применения эксплуатационными службами в зимний период хлористых солей-антиобледенителей.

Определение степени коррозионного износа арматуры железобетонных конструкций является ответственной задачей, поскольку именно эта характеристика в наибольшей степени определяет потерю несущей способности конструкций и, следовательно, от нее главным образом зависит принятие управленческих решений — определение сроков и объемов ремонта, замены поврежденных элементов, ограничения или полного закрытия движения по мосту и др. Точное определение степени коррозии арматуры может быть выполнено только путем извлечения образцов арматурных стержней с последующей их лабораторной обработкой — травлением в ингибированной кислоте и определение потери массы по сравнению с ее справочным значением. При этом, для достаточно надежной оценки в соответствии с требованиями математической статистики, учитывая неравномерность коррозии, необходимо исследовать порядка 10—15 таких образцов-отрезков. Между тем, нарушение целостности хотя бы одного стержня рабочей арматуры приводит к заметной потере несущей способности железобетонной конструкции и уже по этой причине неприемлемо.

Использование при обследованиях оценки степени коррозии по прямым измерениям на обнаженной арматуре в местах сколов бетона не дает надежных результатов из-за малого числа таких сколов и невозможности выполнить точные измерения. Поэтому была разработана оценка степени коррозии арматуры опосредованно по ее внешним проявлениям на поверхности конструкции. Таким признаком послужила величина раскрытия продольной трещины в защитном слое бетона, вызванная коррозией арматуры. Было установлено, что деформации (перемещения) защитного слоя, отжимаемого корродирующим арматурным стержнем:

$$f = 2\Delta,$$

где: Δ — величина коррозии.

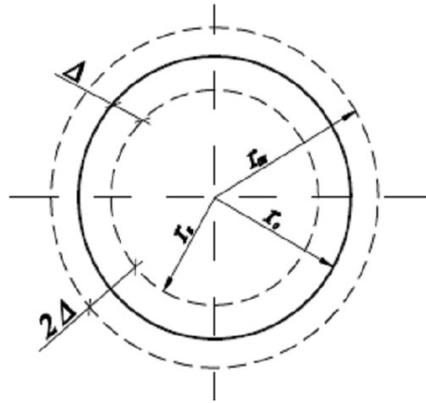


Рис.3.1. Изменение сечения арматурного стержня в результате коррозии. r_0 — начальный радиус сечения арматурного стержня; $r_{ок}$ — наружный радиус оксидного слоя; r_k — радиус сечения арматурного стержня в результате коррозионного износа

Если трещина в конструкции образовалась в результате карбонизации защитного слоя, то на этой стадии можно ограничиться, в основном, профилактическими мероприятиями — окраской и гидрофобизацией бетона, устранением источников локального увлажнения и др. В случае хлоридной агрессии эти меры — недостаточны [22].

В Мадридском институте строительных наук под руководством известного исследователя проф. К. Андраде был выполнен большой эксперимент по изучению разрушения железобетона вследствие коррозии арматуры. Стальные стержни закладывали в бетонный образец с защитным слоем $h=30$ мм, на стержни накладывали постоянный анодный ток, вызывающий коррозию стали, и устанавливали зависимость между шириной раскрытия продольной трещины в защитном слое и коррозионным износом стержня. С этой целью стержни извлекали, протравливали и определяли потерю массы вследствие коррозии. Выводы, сделанные авторами работы, также совпадают с выводами, которые могут быть получены из предыдущего рассмотрения [8]. Полученные результаты слабо зависят от характера армирования и в этом смысле обладают устойчивостью. Практически, они не зависят и от прочности бетона, поскольку для обычных мостовых бетонов классов В30...В40 отношение $R_{bt}/E \approx \text{const}$. В то же время, уменьшенная толщина защитного слоя ускоряет его разрушение, что и наблюдается при

обследованиях. Таким образом, выполненное исследование свидетельствует о возможности получения оценки коррозионного износа арматуры в обследуемых балках пролетных строений мостов без вскрытия на значительном протяжении или на большой площади поверхности элемента. Другим важнейшим фактором при исследованиях железобетонных разрезных мостов является их долговечность.

III.2. Методика оценки эксплуатационного и предельного состояний элементов поврежденных коррозией

Предлагается диахронная модель сопротивления и методика оценки эксплуатационного и предельного состояний изгибаемых поврежденных коррозией железобетонных элементов различного профиля с поперечными трещинами. Здесь термин «диахронность», происходящий от древнегреческих «через» и «время», указывает на способ изучения явлений и систем в их историческом развитии. Изгибаемый элемент рассматривается детерминировано, как регулярная контактная система деформируемых блоков, разделенных равноотстоящими трещинами изменяемого шага.

Смежные блоки взаимодействуют в области сохраняющего сплошность бетона, а также посредством сжатой и растянутой стержневой арматуры. При этом напряженно-деформированное состояние нетрещиностойкого элемента является циклически симметричным относительно характерных сечений двух типов: с трещинами ($l=\pm L$) и равноудаленных от смежных трещин-близнецов ($l=0$) (рис. 3.2). Проблема определения напряженно-деформированного состояния элемента сводится к решению задачи для симметричной половины характерного блока. Диахронная модель построена на основе «метода двух сечений» – инженерно-ориентированного варианта блочно-контактной модели сопротивления железобетона.

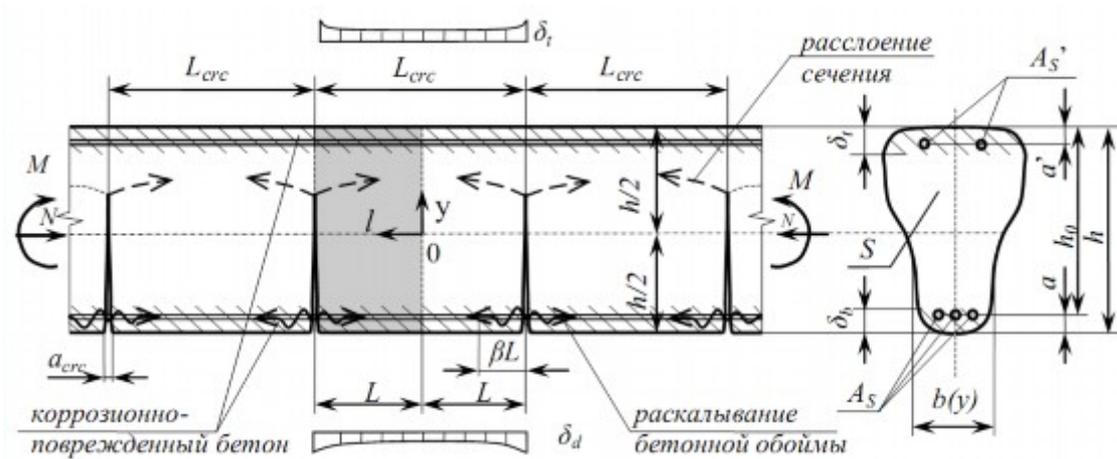


Рис. 3.2. Схема элемента при силовых и коррозионных воздействиях

При таком подходе расчетные зависимости в рамках одномерной задачи строятся только для «опорных» сечений $l=\pm L$ и $l=0$ (рис.3.3). Необходимая взаимосвязь расчетных сечений обеспечивается только посредством краевых деформаций.

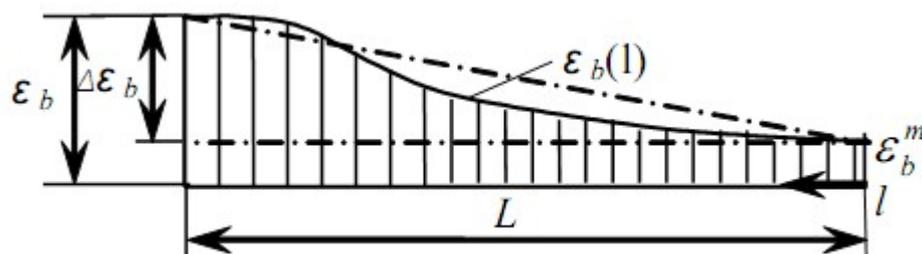


Рис. 3.3. К определению смещений крайнего сжатого волокна бетона

С этой целью эпюра относительных деформаций крайнего сжатого волокна бетона $\epsilon_b(l)$ представляется состоящей из двух частей: прямоугольной с высотой ϵ_b^m (ϵ_b^m - деформации сжатого бетона в сечении $l=0$) и криволинейно-треугольной с высотой $\Delta\epsilon_b = \epsilon_b - \epsilon_b^m$ при $l=L$ (рис. 3.4). Аналогичный прием использован для оценки деформаций арматуры по длине блока. При этом учитывается мнение ряда исследователей (в частности, Ю.П. Гуци, Е.Н. Пересыпкина), что, в отличие от площади, вид функции сцепления арматуры с бетоном $|\tau_{cu} = f(x)|$ мало влияет на значения относительных деформаций бетона ϵ_b и арматуры ϵ_s в сечении с трещиной и на высоту

сжатой зоны x . Таким образом, для оценки смещений U_b и U_s имеем функциональные зависимости:

$$U_b = \varepsilon_b^m L + (\varepsilon_b - \varepsilon_b^m) \cdot L \cdot \omega_b, \quad (3.1)$$

$$U_s = \varepsilon_s^m L + (\varepsilon_s - \varepsilon_s^m) \cdot L \cdot \omega_s, \quad (3.2)$$

где $\omega_b = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b,ul}}$, $\omega_s = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,el}}$ – коэффициенты полноты эпюр $\varepsilon_b(l)$ и $\varepsilon_s(l)$.

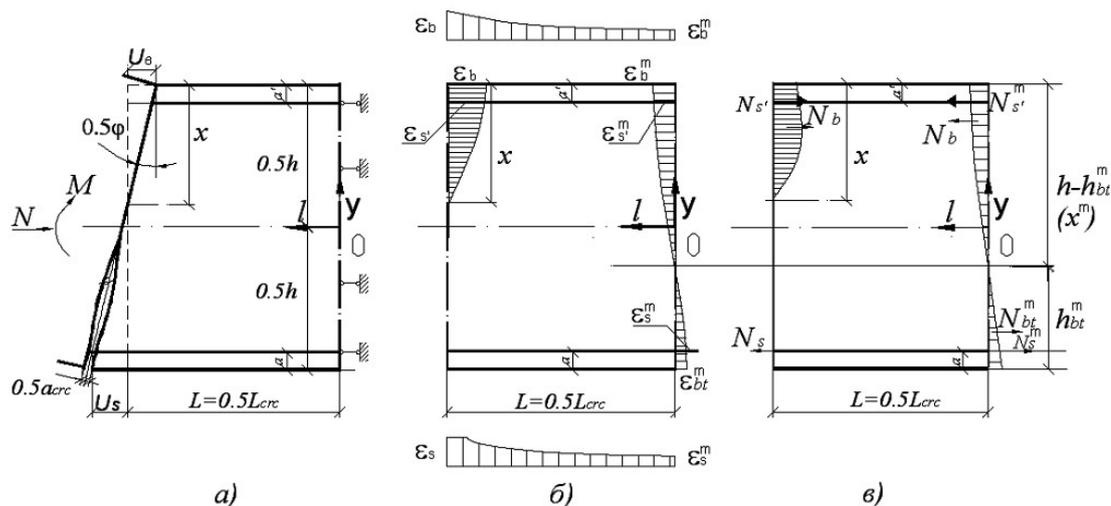


Рис. 3.4. Расчетный блок с эпюрами:

а) перемещений, б) относительных деформаций, в) внутренних усилий

Постулируя вследствие симметрии относительно сечения с трещиной ($l=\pm L$) плоскую форму контакта блоков, изменение продольных перемещений $U_b(y)$ в зоне сплошного бетона, а также их связь с осевыми перемещениями продольной арматуры U_s принимается линейной по высоте сечения:

$$\frac{U_b}{U_s} = \frac{x}{h - x - a}. \quad (3.3)$$

В центральном сечении ($l=0$) расчетного блока принимается линейное распределение по высоте элемента h продольных относительных деформаций бетона:

$$\frac{\varepsilon_b^m}{\varepsilon_s^m} = \frac{h - h_{bt}^m}{h_{bt}^m}. \quad (3.4)$$

Деформации сжатой арматуры ε'_s и ε'^m_s (рис. 3.3) принимаются равными деформациям сжатого бетона, соответственно \square_b и \square_b^m вплоть до достижения предельной сжимаемости бетона \square_{bul} . В центральном сечении деформации растянутой арматуры ε_s^m и растянутого бетона ε_{bt}^m считаются совместными только до $\varepsilon_{bt}^m = \varepsilon_{btR}$. После $\varepsilon_{bt}^m > \varepsilon_{btR}$, имея в виду образование при стесненных деформациях системы неслитных микротрещин, используется условный прием: совместность деформаций растянутой арматуры и бетона нарушается при ограничении максимальных деформаций арматуры $\varepsilon_s^m = \varepsilon_{s,el}$. Следуя рекомендациям действующих СНиП, деформирование растянутой и сжатой стержневой арматуры при $M \leq M_{ult}$ ограничивается линейно-упругой областью. Работа бетона в условиях одноосного напряженного состояния описывается расчетной диаграммой деформирования:

$$\sigma_b(y) = E_b \cdot \varepsilon_b(y) \cdot [1 - \gamma \cdot \varepsilon_b(y)],$$

где $\gamma = 1/2 \varepsilon_{bR}$ ($\gamma = 1/2 \varepsilon_{btR}$) – характеристика нелинейных деформаций, \square_{bR} и \square_{btR} – деформации при пиковых напряжениях R_b и R_{bt} . Основными факторами негативного влияния агрессивных воздействий на железобетонный элемент являются: деградация прочностных и деформационных свойств сжатого и растянутого бетона; коррозия арматурных стержней; повреждения сцепления растянутой арматуры с бетоном.

Изменение геометрических и механических параметров бетона и их комбинаторика зависят от направленности агрессивного воздействия по отношению к сторонам сечения, а также вида и интенсивности агрессии. В общем случае вариации свойств бетона по глубине моделируются по трехзонной схеме (рис. 3.5): полностью разрушенный бетон (уменьшение начальных габаритов сечения); слой частично-поврежденного бетона (у боковых граней сечения δ_s , со стороны сжатой δ_t и/или растянутой δ_b зоны сечения), в пределах которого деформационные (E_b , \square_{bul} , \square_{btul} , \square_{bR} , \square_{btR}) и прочностные (R_b , R_{bt}) характеристики линейно изменяются от нулевого

(минимального) до номинального значения; неповрежденный бетон, сохранивший номинальные характеристики.

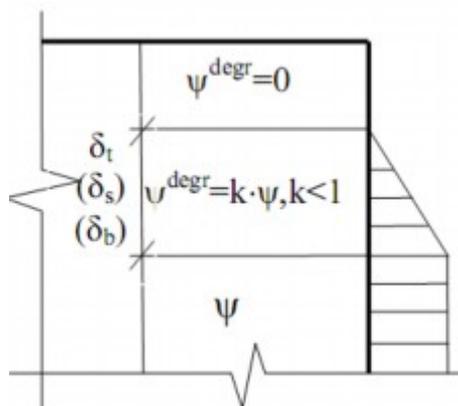


Рис. 3.5. Зонирование бетона у поверхностей элемента (ψ – обобщенная характеристика)

При отсутствии полностью разрушенного бетона, пониженные характеристики краевых волокон бетона эксплуатируемых сооружений устанавливаются по результатам технического обследования. Для проектируемых сооружений аналогичные параметры определяются в соответствии с принятыми моделями деградации (например, диссипативная модель В. М. Бондаренко, степенные функции А. И. Попеско [26]).

Одновременно, за счет снижения начального модуля деформации E_b , сопротивлений R_b , R_{bt} и базовых деформаций \square_{bR} и \square_{bul} в пределах коррозионно-поврежденного слоя трансформируются исходные диаграммы деформирования сжатого и растянутого бетона (рис. 3.6). Равномерная и питтинговая коррозия металла [32] отражается независимым либо согласованным (в зависимости от направленности и характера агрессивного воздействия) уменьшением площади исходных поперечных сечений растянутой A_s и сжатой A'_s арматуры с учетом неравномерности коррозии арматуры по длине блока.

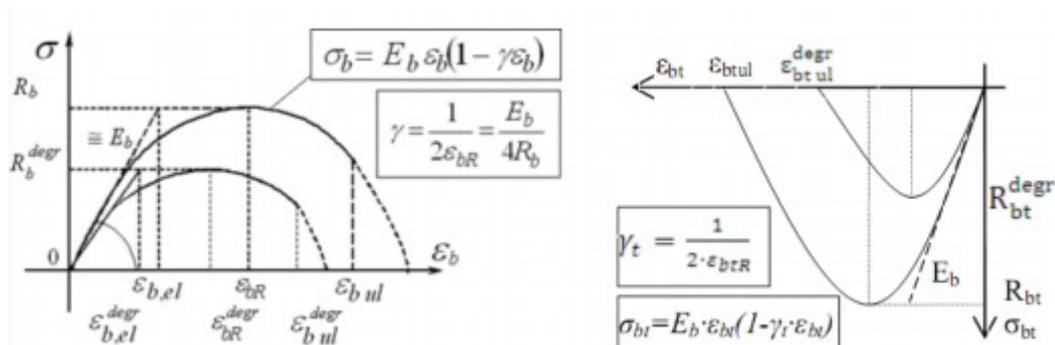


Рис. 3.6. Трансформация диаграмм деформирования бетона при сжатии и растяжении

Учитывается влияние уровня напряжений и вида напряженного состояния на степень коррозии. Так, усиленная деструкция бетона имеет место в сечении с трещиной. За счет прямого доступа агрессивных сред через раскрытую трещину здесь формируется и локальный максимум потери сечения площади растянутой арматуры (рис. 3.2). Коррозионные повреждения контактной системы «арматура-бетон» обусловлены суперпозицией избыточного давления продуктов коррозии арматуры, превышающих первоначальный объем металла в 2-4 раза, и расклинивающего эффекта при выходе профилированного арматурного стержня из бетона. Сложные физические процессы отражаются путем трансформации закона сцепления и снижения длины активного сцепления.

Локальный закон сцепления « $\tau_{сц} - g$ » трансформируется в соответствии с предложением Н. Schlune [48] за счет введения дополнительных смещений арматуры относительно бетона $\Delta g = m \cdot \delta_d$, где δ_d – глубина коррозии арматуры, m – эмпирический коэффициент. При этом формально исходный график « $\tau_{сц} - g$ » как жесткое целое смещается на Δg в отрицательную область оси абсцисс. Существенным фактором является раскалывание бетонной обоймы арматуры с соответствующим уменьшением участка активного сцепления. При этом по разным источникам остаточные касательные напряжения сцепления $\tau_{ост}$ оцениваются от $0,4 \cdot \tau_{max}$ (СЕВ-FIP 1990, τ_{max} – прочность сцепления) до нуля (А.А. Прокопович).

$$a_{crc} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\vartheta}{6 \cdot \tau_{max}} \cdot \left(\sqrt{\varepsilon_s} - \frac{2 \cdot \tau_{max}}{\vartheta} \cdot L_{crc} \right)^3, \quad (3.6)$$

$$\text{где } \vartheta = E_s \cdot d_s \cdot \sqrt{\frac{R_s}{E_s}};$$

$$L_{crc} = \frac{\left(\sqrt{\varepsilon_s} - \sqrt{\varepsilon_s^m} \right) \cdot \vartheta}{2 \cdot \tau_{max}}. \quad (3.7)$$

$$\int b(y) \sigma_b(y) dy + \int b(y) \sigma_b^{deg r}(y) dy + \varepsilon'_s E_s A'_s - \varepsilon_s E_s A_s - N = 0$$

$$\int b(y) \sigma_b^{deg r}(y) \left(\frac{h}{2} - a + y \right) dy + \varepsilon'_s E_s A'_s (h - a - a') - N \left(\frac{h}{2} - a \right) - M = 0$$

$$\frac{U_s}{U_b} = \frac{h - h_c - a}{h_c} \quad (3.8)$$

Математическая модель сопротивления поврежденных коррозией изгибаемых железобетонных элементов с магистральными трещинами представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений из условий статической эквивалентности $\Sigma N=0$, $\Sigma M=0$ и условий совместности (1) и (2) для характерных сечений [30]. Так, система уравнений, для сечения с трещиной $l=L$ имеет вид приведенной 8 формуле. Неизвестными в разрешающей системе уравнений являются: высота сжатой зоны бетона x_c , относительные деформации наиболее сжатого волокна бетона ε_b и растянутой арматуры ε_s в сечении с трещиной $l=L$, и три аналогичных параметра в центральном сечении $l=0$ (x^m , ε_b^m , ε_s^m). Расчетная процедура начинается с анализа центрального сечения ($l=0$) при заданном изгибающем моменте M и нормальной силе N . Исходными данными здесь являются:

- геометрические характеристики сечения и параметры армирования;
- прочностные и деформационные характеристики бетона и арматуры;
- локальные параметры коррозионного повреждения бетона и арматуры

(δ_t^m , δ_b^m , δ_s^m , и δ_d^m). Относительная высота сжатой зоны элемента ξ^m , относительная деформация сжатого бетона ε_b^m и растянутой арматуры ε_s^m в среднем сечении $l=0$ используются далее при определении основных

неизвестных задачи в сечении с трещиной $l=\pm L$. Для этого при тех же внутренних усилиях M и N , геометрических характеристиках сечения и параметрах армирования решается система (8) с заданными параметрами коррозионных повреждений бетона и арматуры в сечении $l=\pm L$. Далее, зная для сечения с нормальной трещиной относительную высоту сжатой зоны ξ , относительную деформацию сжатого бетона ε_b и растянутой арматуры ε_s , вычисляются ширина раскрытия (6) и шаг (7) поперечных трещин, локальная

кривизна элемента $\rho = \frac{\varphi}{2 \cdot L} = \frac{U_b}{x} = \frac{U_s}{h-x-a}$. При необходимости ($\beta \neq 0$)

длина участка активного сцепления $(1-\beta)L$ уточняется методом простой итерации. Полученный комплекс параметров напряженно-деформированного состояния бетона и арматуры в пределах расчетного блока позволяет с методологически единых позиций оценивать расширенную номенклатуру предельных состояний элемента:

- достижение растянутой арматурой в трещине предела текучести, $\varepsilon_s = \varepsilon_{s,el}$, (при коррозионном повреждении арматуры $\varepsilon_s = \varepsilon_s^{degr}$);
- исчерпание несущей способности сжатого бетона в сечении с трещиной, $\varepsilon_b = \varepsilon_{b,ul}$ (при коррозионном повреждении бетон $\varepsilon_b = \varepsilon_{bul}^{degr}$);
- откол защитного слоя бетона и потеря сцепления арматуры с бетоном, $\beta=1$;
- расслоение сечения вторичными продольными трещинами, $\sigma_{spl} = R_{bt}$;
- чрезмерное раскрытие нормальной трещины, $a_{crc} = a_{crc,ul}$;
- чрезмерный угол поворота $\varphi = \varphi_{ul}$ и/или прогиб $f = f_{ul}$.

Предлагаемая диахронная модель деформирования позволяет определить напряженно-деформированное состояние эксплуатирующихся железобетонных элементов и остаточный срок их эксплуатации. Расчет проводится в следующей последовательности:

1. На основании данных технической диагностики определяются фактические характеристики и параметры бетона и арматуры в зонах с трещинами и за их пределами, габариты сечения, параметры повреждения

бетона и арматуры, шаг и ширина раскрытия трещин, наличие расколов и расслоений.

2. Определяется напряженно-деформированное состояние элемента, предельного момента $M_{ult, \text{тек}}$, шага и ширины раскрытия трещин $a_{срс}$, прогиба f , наличие расколов и расслоений на текущий момент времени $t_{\text{тек}}$. При превышении $M_{ult, \text{тек}}$ требуемого изгибающего момента $M_{\text{проект}}$, ширине раскрытия трещин менее допустимой нормируемой, не превышения предельного прогиба f_{ult} и сохранения сплошности элемента производится дальнейший расчет. При фиксации возможности наступления предельного состояния хотя бы по одному из параметров делается вывод о необходимости усиления или замены элемента.

3. На основании данных об агрессивной среде эксплуатации по моделям деградации бетона арматуры определяется дальнейшая кинетика физико-механических свойства материалов для моментов времени t_1 , t_2 и т. д.

4. Определение напряженно-деформированного состояния элемента и предельного момента $M_{ult,1}$, $M_{ult,2}$ и т.д. и всех других факторов наступления предельных состояний во время соответственно t_1 , t_2 и т.д.

5. Определение остаточного ресурса $t_{ост}$ железобетонного элемента по следующей схеме:

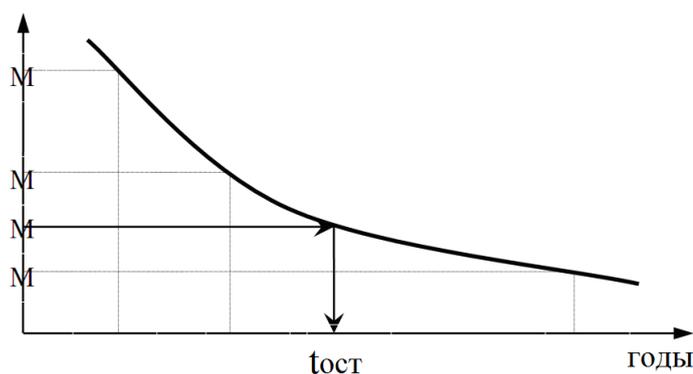


Рис. 3.8. Схема определения остаточного ресурса железобетонного элемента по графику предельного момента

Аналогично определяется наступление предельных состояний по другим предельным факторам. По результатам расчета принимается решение

о необходимости усиления рассматриваемого элемента или использовании вторичной защиты.

III.3. Оценка проектного ресурса типовой изгибаемой железобетонной балки

На базе диахронной модели сопротивления железобетонных элементов выполнен оценка проектного ресурса типовой изгибаемой железобетонной балки, работающей агрессивной промышленной газовой среде. Рассматривается железобетонная балка длиной 12 м по серии 3.503-12 выпуск 1 «Балки каркасные армированные арматурой класса А-III для мостов и путепроводов». Длина конструкции 12000 мм, расчетный пролет 11400 мм, высота сечения 1080 мм, расчетная ширина полки 1970 мм, армированием ненапрягаемой арматурой $\Phi 16$ АIII, класс бетона В30 (рис. 3.9).

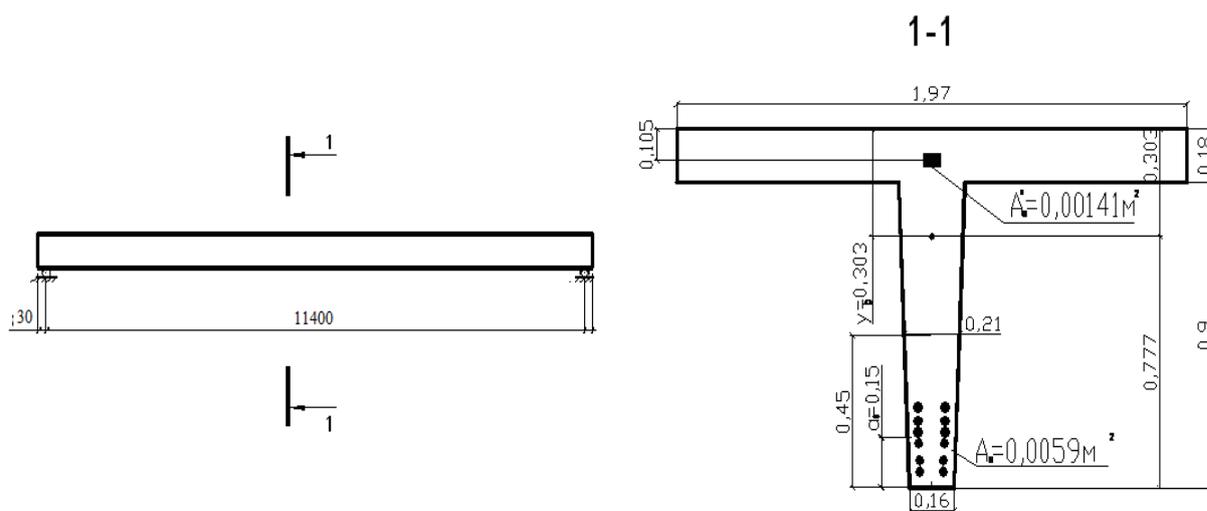


Рис. 3.9. Балка пролетного строения

Для используемого класса бетона выполнен прогноз роста глубины нейтрализации бетона и корродирования арматуры от времени (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Прогнозируемые коррозионные повреждения балки

| № | Длительность эксплуатации, лет | Глубина нейтрализации бетона, мм | Глубина коррозии арматуры в трещиностойком бетоне, мм | Глубина коррозии арматуры в нетрещиностойком бетоне, мм |
|---|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1 | 1 | 2,0 | 0,008 | 0,019 |
| 2 | 3 | 4,0 | 0,043 | 0,057 |
| 3 | 5 | 4,3 | 0,117 | 0,171 |
| 4 | 10 | 5,69 | 0,119 | 0,342 |
| 5 | 20 | 8,51 | 0,12 | 0,684 |
| 6 | 50 | 13,3 | 0,12 | 1,71 |

Фронтальность нейтрализации бетона принимается со стороны растянутой зоны и с боковых граней сечения.

Время инициации коррозии растянутой арматуры при заданных условиях эксплуатации прогнозируется 9 месяцами.

Результаты расчетов по диахронной модели представлены в табл. 2.3.

Таблица 3.2.

Расчетная несущая способность балки

| № | Длительность эксплуатации, лет | Прогнозируемая несущая способность, кН·м | Снижение несущей способности, % |
|---|--------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | - | 259 | - |
| 2 | 1 | 258,5 | 0,2 |
| 3 | 3 | 257,5 | 0,5 |
| 4 | 5 | 255,7 | 1,4 |
| 5 | 10 | 251 | 2,5 |
| 6 | 20 | 244,5 | 5,1 |
| 7 | 50 | 225,5 | 12,4 |

Выполненный расчет показал, что даже при обеспечении предельно допустимых концентраций содержания паров щелочей, кислот и других агрессивных газов в воздухе рабочей зоны, прогнозируется снижение несущей способности железобетонных элементов на 12,4% за 50 лет. Данное снижение необходимо учитывать при подборе ригеля на заданную проектную нагрузку.

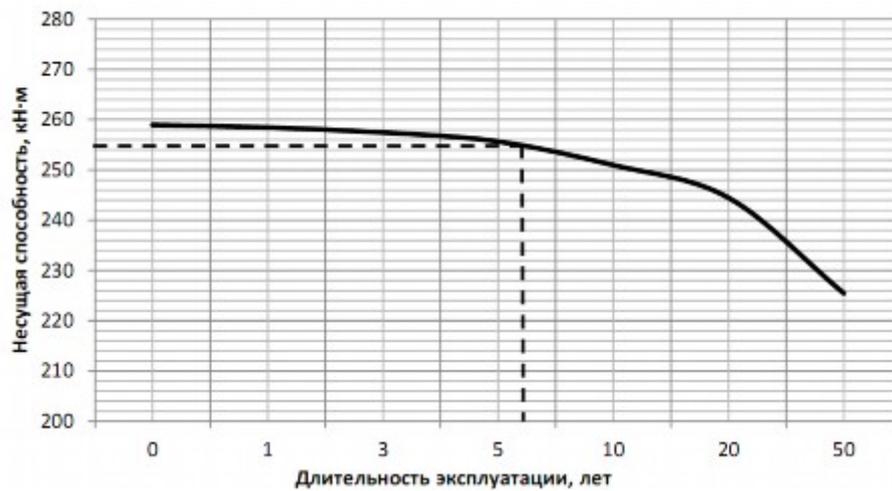


Рис. 3.10. Прогнозируемая несущая способность балки

Таким образом, при проектной нагрузке 70 кН/м, вызывающей максимальный изгибающий момент в середине пролета 255,15 кН·м, при указанном воздействии агрессивной среды срок службы ригеля составит 6,5 лет (рис. 3.10).

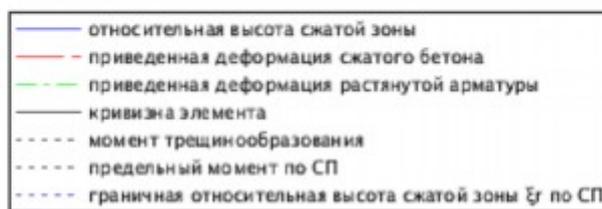
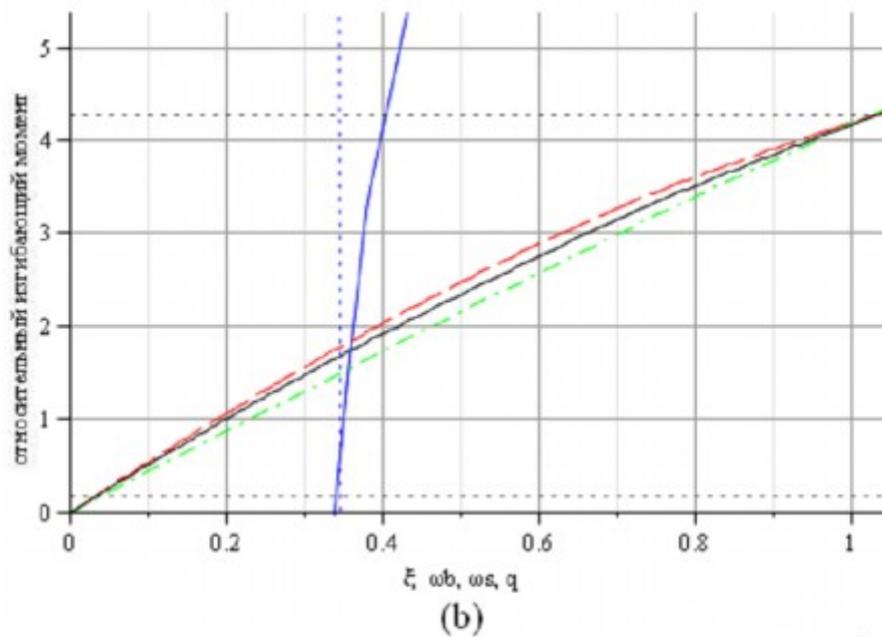
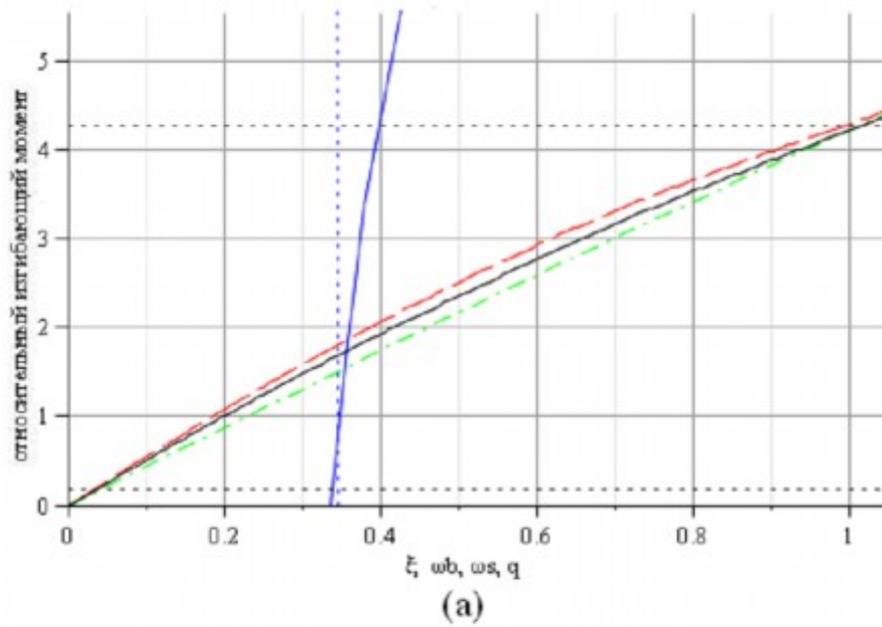
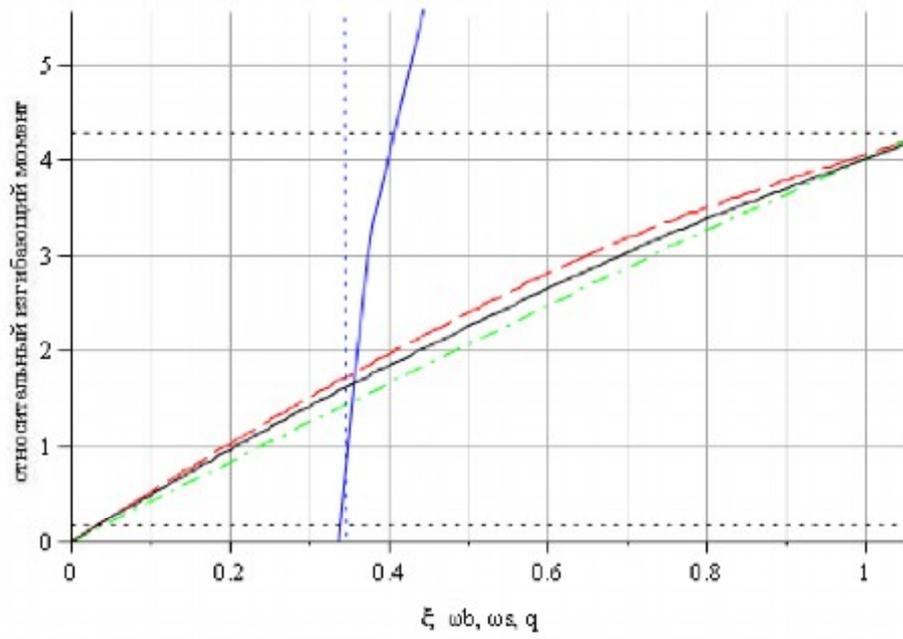
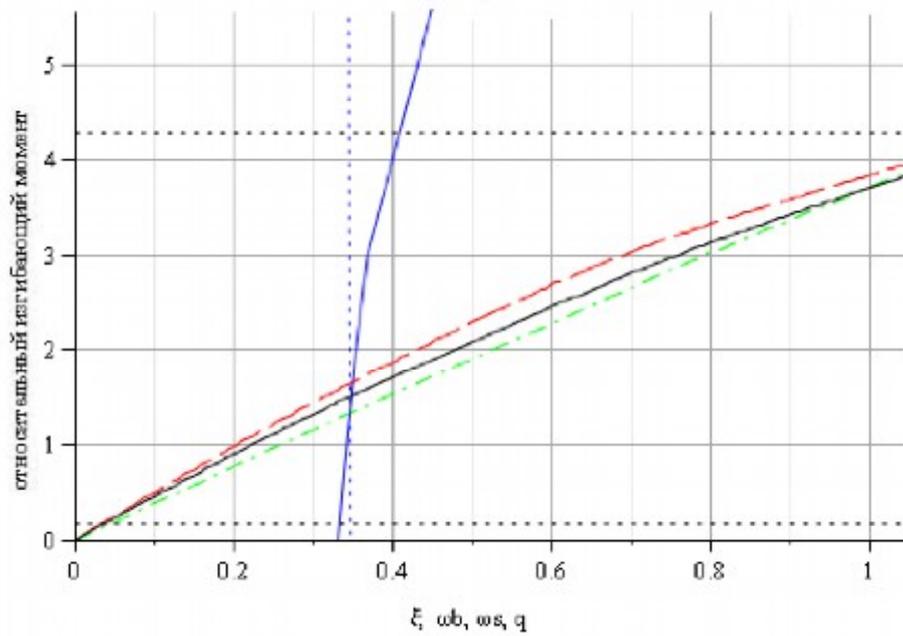


Рис. 3.11. Зависимость относительной высоты сжатой зоны, приведенные деформации сжатого бетона и растянутой арматуры от относительного изгибающего момента: а) неповрежденная балка, б) срок эксплуатации 5 лет



(a)



(b)

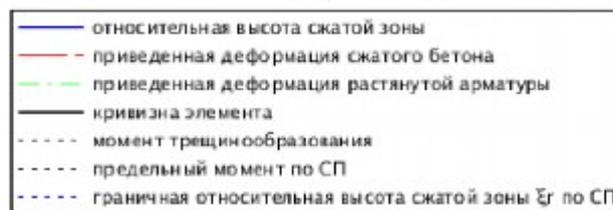


Рис. 3.12. Зависимость относительной высоты сжатой зоны, приведенные деформации сжатого бетона и растянутой арматуры от относительного изгибающего момента при сроке эксплуатации: а) 20 лет, б) 50 лет

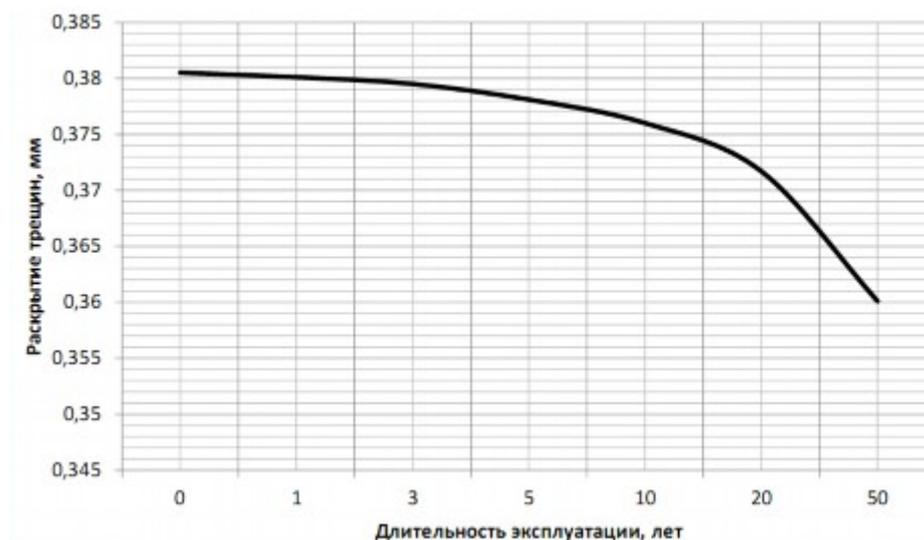


Рис. 3.13. Прогнозируемое раскрытие трещин

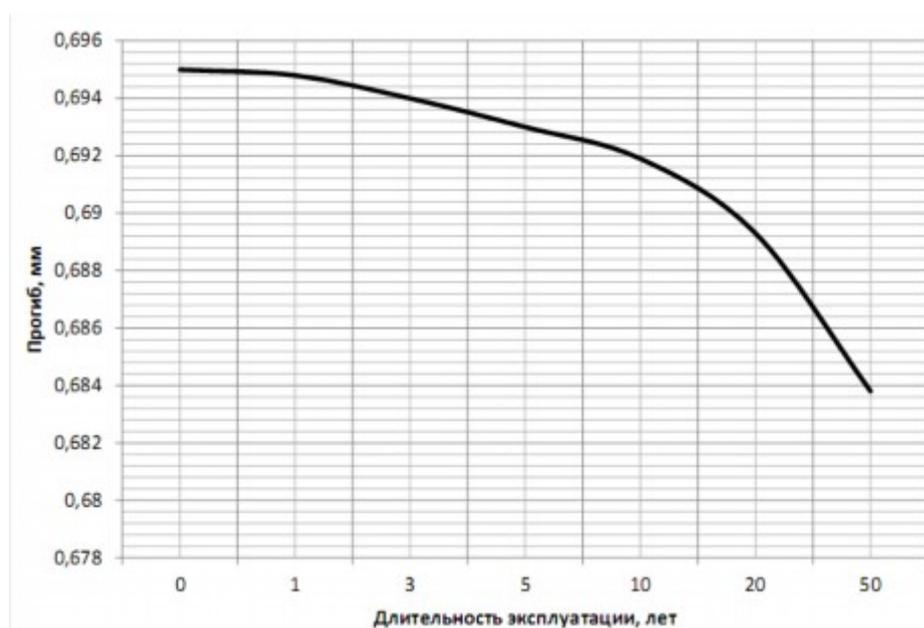


Рис. 3.14. Прогнозируемый прогиб балки

Снижение прогибов балки (рис. 3.14) и уменьшение ширины раскрытия трещин (рис.3.13) говорит о проявлении охрупчивания. Расчет по предлагаемой модели позволяет произвести подбор конструкции изгибаемой алки, работающей в агрессивной среде с требуемым сроком службы.

Таким образом, основными достоинствами диахронной модели сопротивления являются:

- отказ от априорного задания схемы разрушения элемента;

- учет коррозионных повреждений бетона и арматуры, в том числе с учетом влияния неравномерности повреждений на шаге трещин;
- возможность определения проектного и остаточного ресурса элемента;
- расчетное обеспечение однородной долговечности элементов (за счет обеспечения одновременности наступления локальных предельных состояний) и конструкции в целом (путем обеспечения равного ресурса составляющих её элементов);
- уточненная оценка несущей способности перearмированных элементов;
- расчет ширины раскрытия нормальных трещин на расширенном диапазоне изменения изгибающих моментов;
- количественная оценка «охрупчивания» разрушения коррозионно-поврежденных элементов, которое сопровождается обманчивым снижением прогибов и раскрытий нормальных трещин;
- обоснование необходимости применения вторичной защиты. Важно отметить, что применение предлагаемой методики впервые открывает возможность актуального повышения экономической эффективности проектных решений путем обеспечения однородной долговечности железобетонных конструкций с синхронизацией проектного ресурса отдельных зон, элементов и частей зданий и сооружений.

Выводы по главе III

В настоящей главе отмечается актуальность разработки методологически единых подходов к оценке эксплуатационных и предельных состояний железобетонных элементов при одновременном воздействии силовых нагрузок и агрессивных сред. Предлагается диахронная модель деформирования коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов с макротрещинами (швами). Приводятся результаты численных

экспериментов. Проводится верификация предлагаемой модели с лабораторными экспериментами различных авторов.

Обсуждается возможность прямой оценки проектного и остаточного ресурса элементов. Предлагается графоаналитическая методика определения проектного ресурса вновь возводимых и остаточный ресурс эксплуатируемых изгибаемых железобетонных конструкций. На базе диахронной модели сопротивления железобетонных элементов выполнена оценка проектного ресурса типовых изгибаемых железобетонных балок, работающих в агрессивных газоздушных средах. Производится подбор конструкции изгибаемой балки, работающей в агрессивной среде с требуемым сроком службы. Обсуждается возможность повышения долговечности за счет повышения класса прочности бетона, назначения класса бетона по водонепроницаемости, усиления армирования или применения вторичной защиты. Обосновывается возможность актуального повышения экономической эффективности проектных решений путем обеспечения однородной долговечности железобетонных конструкций с синхронизацией проектного ресурса отдельных зон, элементов и частей сооружений мостов.

Снижение прогибов балки и уменьшение ширины раскрытия трещин говорит о проявлении охрупчивания. Расчет по предлагаемой модели позволяет произвести подбор конструкции изгибаемой балки, работающей в агрессивной среде с требуемым сроком службы.

Таким образом, основными достоинствами диахронной модели сопротивления являются:

- отказ от априорного задания схемы разрушения элемента;
- учет коррозионных повреждений бетона и арматуры, в том числе с учетом влияния неравномерности повреждений на шаге трещин;
- возможность определения проектного и остаточного ресурса элемента;
- расчетное обеспечение однородной долговечности элементов (за счет обеспечения одновременности наступления локальных предельных

состояний) и конструкции в целом (путем обеспечения равного ресурса составляющих её элементов);

- уточненная оценка несущей способности перearмированных элементов;

- расчет ширины раскрытия нормальных трещин на расширенном диапазоне изменения изгибающих моментов;

- количественная оценка «охрупчивания» разрушения коррозионно-поврежденных элементов, которое сопровождается обманчивым снижением прогибов и раскрытий нормальных трещин;

- обоснование необходимости применения вторичной защиты. Важно отметить, что применение предлагаемой методики впервые открывает возможность актуального повышения экономической эффективности проектных решений путем обеспечения однородной долговечности железобетонных конструкций с синхронизацией проектного ресурса отдельных зон, элементов и частей зданий и сооружений.

Заключение

Повышение надежности и долговечности мостовых сооружений возможно при решении комплекса взаимосвязанных задач. На стадии эксплуатации – правильная организация процесса эксплуатации на базе научно-обоснованной методики прогнозирования ресурса. Обеспечение стабильных работающих связей между указанными факторами позволит обеспечить и повысить долговечность конструкции.

В решении задач технической эксплуатации строительного фонда инженерная оценка технического состояния конструктивных элементов, оборудования и сооружения в целом - диагностика - занимает центральное место. Задача диагностики - изучение и определение признаков и причин повреждений, а также разработка способов и средств их анализа и оценки.

Длительное и систематическое изучение стойкости разнообразных железобетонных конструкций в различных условиях эксплуатации, 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. 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. Имеются многочисленные исследования, посвященные проблемам повышения долговечности конструкций мостов в условиях коррозии бетона и арматуры. Однако до настоящего времени по результатам этих данных трудно количественно оценить грузоподъемность эксплуатируемых пролетных строений мостов и прогнозировать запаса прочности для планирования межремонтных сроков. Расчет долговечности и надежности конструкций должен учитывать динамику процессов протекающих в материале под

действием агрессивных сред. Для этого должны быть определены основные характеристики сопротивления бетонов действию химически-активных веществ и определен механизм взаимодействия материала со средой.

Таким образом, исследование, направленное на разработку эффективных способов определения, учета в расчетах мостовых сооружений влияния коррозии бетона и арматуры, является актуальной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Поэтому целью магистерской диссертационной работы является совершенствование и разработка современных методов технической диагностики железобетонных конструкций мостов имеющих повреждения в виде коррозии бетона и арматуры для определения срока службы эксплуатируемых транспортных сооружений. Для достижения этой цели должны быть сформулированы следующие задачи:

- проанализировать коррозионные процессы в железобетонных мостах и сооружениях;

- изучить методы мониторинга, диагностики и способов антикоррозионной защиты эксплуатируемых мостов и сооружений;

- предложение современных методов диагностики и способов регенерации железобетонных конструкций для обеспечения их эксплуатационной надежности;

- разработка принципов методов и средств диагностики коррозионных дефектов в арматуре железобетонных мостов;

- с помощью математических моделей сооружения оценивать и прогнозировать влияние различных эксплуатационных, технологических и конструктивных факторов на работоспособность сооружения, выявлять причины отказов.

Выявлено что коррозионные поражения приводят к дефектам виде трещин, отслоения бетона вдоль арматуры, выщелачивания, растрескивание и потеки на поверхности железобетонных элементов. 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.

Для ремонта на основании проведенного обзора рекомендуется следующие методы усиления традиционные, и в тех случаях когда традиционные методы неперспективны рекомендуется новые метода усиления с применением из углеродных волокон. Материал абсолютно водонепроницаем, устойчив к коррозии и есть возможность предварительно напряжения лент непосредственно перед наклеиванием их на конструкцию. В результате усиления железобетонных конструкций материалами из углеродных волокон с высоким модулем упругости снижаются напряжения в арматурной стали, и уменьшается ширина раскрытия трещин.

Выявлено такие приборы для диагностики коррозионных дефектов:

- прибор ИПС-МГ4.01 предназначен для оперативного неразрушающего контроля прочности и однородности бетона и раствора методом ударного импульса по ГОСТ 22690;

- прибор ИПА-МГ4 предназначен для оперативного контроля толщины защитного слоя бетона, определения диаметра и расположения стержневой арматуры в железобетонных изделиях магнитным методом по ГОСТ 22904.

- прибор ПУЛЬСАР-1.0/1.1 Прибор позволяет определять прочность бетона (ГОСТ 17624), выявлять дефекты (трещины, пустоты), оценивать несущую способность ж/б конструкций, пористость и трещиноватость горных пород, степень анизотропии и текстуру композитных материалов.

Отмечается актуальность разработки методологически единых подходов к оценке эксплуатационных и предельных состояний железобетонных элементов при одновременном воздействии силовых нагрузок и агрессивных сред. Предлагается диахронная модель деформирования коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов с макротрещинами (швами). Приводятся результаты численных

экспериментов. Проводится верификация предлагаемой модели с лабораторными экспериментами различных авторов.

Обсуждается возможность прямой оценки проектного и остаточного ресурса элементов. Предлагается графоаналитическая методика определения проектного ресурса вновь возводимых и остаточный ресурс эксплуатируемых изгибаемых железобетонных конструкций. На базе диахронной модели сопротивления железобетонных элементов выполнена оценка проектного ресурса типовых изгибаемых железобетонных балок, работающих в агрессивных газоздушных средах. Производится подбор конструкции изгибаемой балки, работающей в агрессивной среде с требуемым сроком службы. Обсуждается возможность повышения долговечности за счет повышения класса прочности бетона, назначения класса бетона по водонепроницаемости, усиления армирования или применения вторичной защиты. Обосновывается возможность актуального повышения экономической эффективности проектных решений путем обеспечения однородной долговечности железобетонных конструкций с синхронизацией проектного ресурса отдельных зон, элементов и частей сооружений мостов.

Снижение прогибов балки и уменьшение ширины раскрытия трещин говорит о проявлении охрупчивания. Расчет по предлагаемой модели позволяет произвести подбор конструкции изгибаемой балки, работающей в агрессивной среде с требуемым сроком службы.

Таким образом, основными достоинствами диахронной модели сопротивления являются:

- отказ от априорного задания схемы разрушения элемента;
- учет коррозионных повреждений бетона и арматуры, в том числе с учетом влияния неравномерности повреждений на шаге трещин;
- возможность определения проектного и остаточного ресурса элемента;
- расчетное обеспечение однородной долговечности элементов (за счет обеспечения одновременности наступления локальных предельных

состояний) и конструкции в целом (путем обеспечения равного ресурса составляющих её элементов);

- уточненная оценка несущей способности перearмированных элементов;

- расчет ширины раскрытия нормальных трещин на расширенном диапазоне изменения изгибающих моментов;

- количественная оценка «охрупчивания» разрушения коррозионно-поврежденных элементов, которое сопровождается обманчивым снижением прогибов и раскрытий нормальных трещин;

- обоснование необходимости применения вторичной защиты. Важно отметить, что применение предлагаемой методики впервые открывает возможность актуального повышения экономической эффективности проектных решений путем обеспечения однородной долговечности железобетонных конструкций с синхронизацией проектного ресурса отдельных зон, элементов и частей зданий и сооружений.

Список использованной литературы

1. Защита от коррозии металлических и железобетонных мостовых конструкций методом окрашивания/ И.Г. Овчинников, А.И. Ликверман, О.Н. Распоров и др. – Саратов: Изд-во «Кубик», 2014. 504 с.
2. Аксютин С.А. Опыт применения лакокрасочных материалов / С.А. Аксютин, В.И. Копырин // Транспортное строительство.2006. №2. С. 18-20.
3. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. 368 с.
4. Макаров В.Н. Антикоррозионная защита мостовых сооружений / В.Н. Макаров, С.В. Овсянников, И.Г. Овчинников. Саратов: Издат. Центр «Наука», 2007. 192 с.
5. Во что одеть мосты? / В.Н. Макаров, О.Н. Распоров, И.Г. Овчинников, А.Г. Щербаков // Дороги России XXI века. 2002. №5. С.68-79.
6. Городские транспортные сооружения: правила эксплуатации / Министерство жилкомхоза БССР. Минск, 1989. 185 с.
7. Иванов Ф.М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии / Ф.М. Иванов. М.: Транспорт, 1968. 110 с.
8. Кириллов В.С. Эксплуатация и реконструкция мостов и труб на автомобильных дорогах / В.С. Кириллов. М.: Наука, 1971. 196 с.
9. Колесникова А.С. Химические основы защиты транспортных сооружений от коррозии: метод. пособие / А.С. Колесникова. Хабаровск: ДВГУПС, 2001. 112 с.
10. Коррозия: справочник / под ред. Л.Л. Шрайера; пер. с англ. М.: Металлургия, 1981. 632 с.
11. Кривоногов А.Г. Антикоррозионная защита мостов и эстакад полиуретановыми материалами «Stelpant» / А.Г. Кривоногов // Путьевой. 2006. №13. С. 7.

12. Ликверман А.И. Эффективная система защиты металлических мостов от коррозии / А.И. Ликверман, Ф.Б. Глазман, К.О. Распоров // Транспортное строительство. 2001. №8. С. 2-5.

13. Лукьянов В.С. Защита бетонных опор мостов от температурных трещин / В.С. Лукьянов, И.И. Денисов. М.: Трансжелдориздат, 1959, 151 с.

14. Макаров В.Н. Антикоррозионная защита мостовых сооружений / В.Н. Макаров, С.В. Овсянников, И.Г. Овчинников. Саратов: Издательский центр "Наука", 2007. 192 с.

15. Маринин А.Н. Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации / А.Н. Маринин, Р.Б. Гарибов, И.Г. Овчинников. Саратов: Издат. центр «РАТА», 2008. 296 с.

16. Москвин В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузеев. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.

17. Овчинников И.Г. Обеспечение долговечности мостовых железобетонных конструкций – опыт применения противокоррозионной защиты / И.Г. Овчинников, О.Н. Распоров, К.О. Распоров, М.В. Палагина // Дороги России 21 века. 2008. №8. С. 92-97.

18. Савчинский, Б. В. Критерии оценки надежности железобетонных конструкций автодорожных мостов [Текст]: тезисы докл. Межд. науч.-практ. конф. «Мосты и тоннели: теория, исследования, практика» / Б. В. Савчинский, – Д.: ДНУЗТ, 2007. – С. 62-63.

19. Измерительные приборы фирмы Proceid для исследования свойств строительных материалов [Текст] / Рекламный каталог. – М.: Триада-Холдинг, 2001.

20. Маринин А.Н. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния железобетонных мостовых пролетных строений с учетом хлоридной коррозии и карбонизации : диссертация ... кандидата технических наук.- Волгоград, 2007.- 383 с.

21. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1991.
22. Панасюк В.В. Механика разрушения и прочность материалов / Справ. пос. в 4-х т. под. ред. В.В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988-1990.
23. Пирадов К.А., Гузеев Е.А. Механика разрушения железобетона. – М.: 1998.
24. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. Зб. наукових статей. Науковий керівник - академік НАН України Б.Є.Патон. – Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України. К.: 2006.
25. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат. – 1978. – 239 с
26. Руководство по определению диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1974. – 20с.
27. СНиП 2.05.03-84 “Мосты и трубы”, Госстрой СССР. – М.: ЦИТП. 1985.
28. Чирков В.П. Вероятностные методы расчета мостовых железобетонных конструкций. М.: Транспорт, 1980.
29. “New Approach to Durability Design”,- CEB Bulletin d’Information No.238, 1997 24. EN 1990-2001. Eurocode: Basis of Structural Design. – Brussels: CEN, 2001.- 89 p
30. Frangopol D. et al. Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges. Journal of 32. СП 28.13330.2012 Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85. Введ. 01.01.2013. М., 2012. 99 с.
31. Справочное пособие «Антикоррозионная защита». Екатеринбург: Издательский дом «Оригами», 2013. 440 с.
32. Старосельский А.А. Коррозия и защита железобетонных конструкций и сооружений электрифицированных железных дорог: учеб. пособие / А.А. Старосельский. Харьков: ХИИТ, 1988. 82 с.

33. Степанова В.Ф. Защитные материалы для бетонных мостов / В.Ф. Степанова, В.М. Мезенов, О.Ю. Субботина, Д.Н. Лупанов // Дорожная держава. 2009. №21. С.80-82.

34. СТО-017-2007 Стандарт организации. Бетонные и железобетонные конструкции транспортных сооружений. Защита от коррозии / ГК «Трансстрой». М., 2007. 45 с.

35. Федеральный закон от 27.12.2002 №184-ФЗ «О техническом регулировании». 38. Шлугер М.А. Коррозия и защита металлов / М.А. Шлугер, Ф.Ф. Ажогин, Е.А. Ефимов. М.: Металлургия, 1981. 216 с.

36. ISO 12944-1988 (части 1-8) Международный стандарт. Лаки и краски. Защита от коррозии стальных конструкций системами защитных покрытий.

37. Mezenov V. Tough call for coating / V.Mezenov, M. Golovnenkova // Bridge: design and engineering. 2009. N55. V.15. 64 p.

38. Тодт Ф. Коррозия и защита от коррозии. – Л.: «Химия»; 1967. – 170 с.

39. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защиты металлов. Металлургиздат, 1962.

40. Трещины в железобетоне и коррозия арматуры. Под ред. В.М. Москвина. – М.: Стройиздат. - 1991. 176 с.

41. Указание по определению условий пропуска поездов по железнодорожным мостам. (МПС. – М.: Транспорт, 1989. – 120 с.

42. Хоменко В.П., Власюк Н.В. Защита строительных конструкций от коррозии. Киев.: Будивильник. 1971, - 142 с.

46. Цискрели Г.Д. и Вербецкий Г. П. «Гидротехническое строительство» №6, 1966.

47. Чирков В.П. Вероятностные методы расчета мостовых железобетонных конструкций. М.: Транспорт. – 1980, - 133 с.

48. Чирков В.П. Основы теории расчета ресурса железобетонных конструкций. (Бетон и железобетон, 1992 . № 10.)

49. Чирков В. П. Теоретические основы прогнозирования сроков службы железобетонных конструкций: Учебное пособие.- М.: МИИТ, 1998. - 56 с

50. Schlune, H. Bond of Corroded Reinforcement. Analytical description of the bond-slip response. / H. Schlune, Chalmers University of Technology. Master`s thesis 2006:107. – Göt eborg, Sweden.: 2006. – 85 p.