

Таразский государственный университет имени М.Х. Дулати

На правах рукописи

УДК 626:624.013

Джанузакова Раушан Джанатовна

**Повышение надежности металлических конструкций гидротехнических
сооружений**

05.23.07 – Гидротехническое строительство

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор
Алимбаев Б.А.

Республика Казахстан

Тараз - 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	9
1.1 Надежность металлических конструкций гидротехнических сооружений	9
1.2 Анализ разрушений, аварий и катастроф металлических конструкций гидротехнических сооружений	21
1.3 Анализ исследований напряженно-деформированного состояния металлических конструкций гидротехнических сооружений	63
Выводы и постановка задачи	70
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСИЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ	71
2.1 Экспериментальные исследования тензорезисторного способа измерения напряжений	71
2.2 Экспериментальные исследования атопологического способа измерения напряжений	78
2.3 Экспериментальные исследования электромагнитным методом при измерении напряжений в металлических конструкциях	82
2.3.1 Теоретические предпосылки электромагнитного метода	82
2.3.2 Электромагнитный метод определения напряжений в усиленных элементах металлических конструкций	87
Выводы по главе	92
ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ КОРРОЗИИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ИХ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ	93
3.1 Влияние остаточной намагниченности на развитие коррозии	93
3.1.1 Теория магнетизма	93
3.1.2 Намагничивание элементов металлических конструкций обладающих ферромагнитными свойствами	108

3.1.3 Развитие коррозии в элементах металлических конструкций ферромагнитными свойствами	111
3.2 Развитие коррозии под действием напряжения	115
3.2.1 Развитие коррозии в растянутых элементах металлических конструкций	115
3.2.2 Развитие коррозии в сжатых элементах металлических конструкций	117
3.2.3 Развитие коррозии в изгибаемых элементах металлических конструкций	121
3.2.3 Особенность влияния остаточной намагниченности на развитие коррозии	124
3.3 Особенности развития коррозии в криволинейных участках стальных труб гидротехнических сооружений	126
Выводы по главе	129
ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЮ И ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ	131
4.1 Рекомендации по повышению долговечности металлических конструкций гидротехнических сооружений	131
4.2 Определение коэффициента долговечности в зависимости от коррозии металлических конструкций ГТС	144
4.3 Состояние надежности металлических конструкций Ассинского гидроузла	151
4.4 Состояние надежности металлических конструкций Кызылординского гидроузла	157
Выводы по главе	162
ВЫВОДЫ	164
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ	166
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	167
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	178
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	180

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Металлические конструкции гидротехнических сооружений эксплуатируются в сложнейших условиях. На элементы погруженных затворов действует большое разнообразие нагрузок. Наряду со статическими нагрузками на элементы металлических конструкций при открытии и закрытии затвора могут действовать гидродинамические нагрузки, которые вызывают вибрацию конструкции. В таких случаях потеря несущей способности элементов металлических конструкций гидротехнических сооружений может произойти наряду с потерей прочности и устойчивости и в связи с усталостным разрушением, а также в результате происходящих геометрических изменений, т.е. в результате качественного изменения конфигурации металлических конструкций может наступить предельное состояние относящейся к первой группе. Кроме этого на них также действует вездесущая коррозия металла.

В Республике Казахстан на содержание гидротехнических сооружений, в том числе для проведения исследовательских и ремонтных работ при усилении элементов несущих металлических конструкций выделяются недостаточные средства. Это было установлено в результате проверки генеральной прокуратуры РК.

Происходящие аварии и катастрофы на гидротехнических сооружениях в мире показывают, что последствия аварий и катастрофы могут быть очень сложными как в процессе сохранения жизнь людей, так и в материальном плане. Например, в результате катастрофы, произошедшей в Саяно-Шушенской ГЭС погибло около 80 человек, а материальные затраты исчисляются миллиардами долларов США. В результате катастрофы, произошедшей на платине Кызыл-Агаш в Алматинской области число людских жертв дошло до 45, а материальные затраты только для восстановления жилищных условий составили более 8 млрд. тенге. А недавняя авария на плотине Кокпекты в Карагандинской области унес жизни 5 человек, а стоимость восстановления

плотины еще не определено.

За состоянием гидротехнических сооружений в Казахстане ведется постоянное наблюдение. Вместе с тем, в весенний период во время прохождения паводковых вод, происходят разрушения мостов и других водопропускных сооружений, что вызывают массу неблагоприятных условий для нормального жизнеобеспечения людей. Подобные явления носят чрезвычайный характер, и полностью исключить их нельзя, но количество подобных явлений уменьшить можно. Постоянное наблюдение за состоянием гидротехнических сооружений, в том числе и за состоянием металлических конструкций позволяют уменьшить число аварий. При проведении обследований металлических конструкций необходимо установить элементы металлических конструкций, которых необходимо усилить. Металлические конструкции гидротехнических сооружений запроектированы надежно. Во многих случаях ремонтпригодность конструкций остаются высокими и поэтому, вовремя принятые меры позволяют исключить аварии и катастрофы в связи с потерей несущей способности металлических конструкции.

Долговечность металлоконструкций гидротехнических сооружений в значительной мере зависит от коррозионной агрессивности воды. Хотя причины недостаточной надежности и долговечности многочисленны и не ограничиваются коррозионным износом, есть большая группа сооружений, где фактор агрессивности среды определяет долговечность металлических конструкций. К ним относятся металлические конструкции гидротехнических сооружений.

Связь темы диссертации с научными программами, основными научно-исследовательскими работами, проводимыми научными учреждениями. Диссертационные исследования были связаны с реализацией планов научно-исследовательского центра «Сенімділік» Таразского государственного университета им. М.Х.Дулати по исследованию гидротехнических сооружений в Жамбылской области в 2005-2014 г.г.

Целью работы является исследование усиления элементов

металлических конструкций гидротехнических сооружений и влияние ферромагнитных свойств на развитие коррозии в них.

Для достижения поставленной цели было намечено решить следующие **задачи**:

- выполнить теоретические исследования показывающие эффективность принимаемых конструктивных решений по усилению металлических конструкций гидротехнических сооружений;

- провести экспериментальные исследования для проверки эффективности принятых конструктивных решений по усилению элементов металлических конструкций гидротехнических сооружений, а именно:

1. Применение тензометрического способа измерения деформаций и напряжений в элементах металлических конструкций гидротехнических сооружений.

2. Применение атопологического способа для оценки напряженного состояния усиленных металлических конструкций гидротехнических сооружений.

3. Применение электромагнитного способа для оценки напряженного состояния усиленных конструкций гидротехнических сооружений.

- исследование и определение роли магнитных сил при коррозии элементов металлических конструкций;

- разработка рекомендаций по повышению надежности металлических конструкций.

Научная новизна полученных результатов:

- предложен новый атопологический способ оценки напряженного состояния усиленных металлических конструкций гидротехнических сооружений;

- предложен новый электромагнитный способ оценки напряженного состояния усиленных металлических конструкций гидротехнических сооружений;

- установлена и определена роль магнитных сил, влияющих на процесс коррозии ферромагнитных изделий;

- разработаны рекомендации по повышению надежности металлических

конструкций.

Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке рекомендации по проектированию усиления элементов металлических конструкций гидротехнических сооружений, позволяющие повысить надежность этих конструкций.

Результаты исследований применяются в учебном процессе на кафедре «Строительные материалы и конструкции» Таразского государственного университета имени М.Х.Дулати.

Экономическая значимость полученных результатов. Основные положения диссертации реализованы в ТОО «КазНИИВХ» и в хозяйствах подведомственных Жамбылского филиала ТОО «Казфосфат». Внедрение разработанного способа покрытия металлических конструкций антикоррозионным покрытием способствовало получению годового экономического эффекта **550 тыс. тенге**.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- новый атопологический способ оценки напряженного состояния усиленных металлических конструкций гидротехнических сооружений;
- новый электромагнитный способ оценки напряженного состояния усиленных металлических конструкций гидротехнических сооружений;
- результаты исследования механизма развития коррозии в металлических конструкциях, с учетом их ферромагнитных свойств;
- рекомендации по повышению надежности металлических конструкций.

Личный вклад соискателя состоит в разработке новых способов оценки напряженного состояния усиленных металлических конструкций гидротехнических сооружений, рекомендаций по их повышению надежности, анализе и обобщению литературных данных, выводов и заключений.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы апробировались: на международной научно-практической конференции «Проблемы водного хозяйства» (Тараз – 2006), на международной научно-практической конференции «Современные проблемы рационального

использования водных ресурсов в Казахстане» (Тараз – 2011), на международной научно-практической конференции «Индустриально-инновационное развитие Казахстана - проблемы экологии и безопасности жизнедеятельности» (Атырау – 2012 г.).

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. Материалы диссертационного исследования изложены в 12 научных работах, опубликованных в научных изданиях Республики Казахстан и Кыргызской Республики. Получено 2 инновационных патента на изобретение Республики Казахстан.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, практических рекомендаций, приложений и списка использованной литературы, содержащего 115 наименований. Общий объем диссертации составляет 181 страниц компьютерного текста, с 55 рисунками, 4 таблицами, 2 приложениями.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Надежность металлических конструкций гидротехнических сооружений

Надежность объекта представляет собой характеристику, которую невозможно непосредственно измерить. Однако ее можно оценить на основании опыта эксплуатации данного или аналогичного объекта с помощью приемов теории надежности, используя методы математической статистики и теории вероятностей. Теория надежности – это направление науки, изучающая общие закономерности, на которые следует опираться при проектировании, строительстве, монтаже, испытании, приемке и эксплуатации объектов или их элементов для получения максимальной эффективности [1].

Слово «надежность» люди употребляют в повседневной жизни, в том числе при общении с техникой. Используя это слово, мы говорим о надежности использования тех или иных изделий, предметов, аппаратов, сооружений и т.д. Одной из первых попыток применения приемов теории надежности для расчета гидротехнических сооружений следует считать методику установления допускаемых (неразмывающих) скоростей водного потока, разработанную Ц.К. Мирцхулавой [2] и утвержденную как нормативы в 1962 г.

Надежность — свойство объекта (в частности, механического оборудования), сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и ремонтов, хранения и транспортирования [3]. Требуемые функции, а также состав и экстремальные значения параметров, характеризующих их выполнение, зависят как от конструктивных особенностей механического оборудования и его элементов, так и от его роли в обеспечении работоспособности гидроузла и могут устанавливаться как для комплекса оборудования в целом, так и для его элементов — затворов, приводных механизмов и пр., а также конструктивных частей этих элементов. Например,

требуемыми функциями комплекса механического оборудования водосброса являются своевременный пропуск через сооружение сбросного расхода и регулирование уровней воды в бьефах; параметрами — пропускаемый расход, продолжительность подготовки оборудования к работе в зимний период, скорость подъема (опускания) затвора и др.

Надежность включает в себя показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. При этом различают четыре состояния металлических конструкций [3]: 1) исправное (и работоспособное); 2) неисправное (но работоспособное); 3) неработоспособное (и неисправное); 4) предельное.

Под предельным подразумевают такое состояние оборудования, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его в исправное или работоспособное состояние невозможно или нецелесообразно [4]. Как видно из определения, металлическая конструкция может находиться в предельном состоянии, даже оставаясь работоспособной, если её дальнейшее применение недопустимо в основном по требованиям безопасности её работы или из-за неоправданно большого риска возникновения аварии гидроузла. Например, в процессе эксплуатации несущая металлоконструкция затвора получила значительный коррозионный износ, что увеличило риск ее разрушения. Вместе с тем, оборудование, находящееся в неработоспособном состоянии может не достигнуть предельного, если восстановление его работоспособности целесообразно или допустимо (экономически оправдано). Так, разрушение отдельных элементов затвора (колес, штанг, проушин) приводит к неработоспособному состоянию, которое относительно просто устраняется в процессе ремонта. Таким образом, понятие предельного состояния часто, но не всегда совпадает с неработоспособным.

Событие, заключающееся в переходе оборудования или его элементов из исправного состояния в неисправное (но работоспособное) называется повреждением. Событие, заключающееся в переходе из исправного состояния в

неработоспособное, называется отказом.

Надежность конструкций и сооружений зависит от многих факторов [5]: марки материала, сечения элементов, их форм, качества изготовления и монтажа, условий эксплуатации, своевременного ремонта, в необходимых случаях — усиления конструкций и т.п. Все эти факторы влияют на срок нормальной эксплуатации и определяют несущую способность сооружения и его отдельных конструктивных элементов. Каждая конкретная авария есть результат совокупности нескольких причин, сочетание нескольких неблагоприятных факторов. Вместе с тем, всегда можно выделить основную причину, непосредственно или косвенно приведшую к аварии. Обрушивается или приходит в аварийное состояние самое слабое звено, самый дефектный элемент, неправильно запроектированный или имевший отклонения от проекта. Во многих случаях, главным образом при полном обрушении конструкции, бывает трудно установить основную причину аварии. Установление в каждом конкретном случае основной причины аварии имеет первостепенное значение. В строительной практике известны случаи, когда неправильное установление основной причины аварии приводило к повторению ее в том же месте. При исследовании аварий следует совершенно четко разграничивать основную причину от непосредственной причины, вызывающей аварию.

Процесс потери работоспособности оборудования может протекать двояко. В случаях, когда значение внешнего воздействия на элемент оборудования превышает некоторый предел (фактический предел сопротивляемости элемента), сразу происходит разрушение «слабого звена» и элемент или оборудование в целом не может выполнять заданные функции. Такой отказ принято называть отказом функционирования. В других случаях, вследствие протекания процессов старения, износа и т.п., изменяются первоначальные свойства и состояние элементов оборудования, при этом в процессе эксплуатации наступает такой момент, когда значения эксплуатационных показателей выходят за установленные пределы, т.е. в конце концов, происходит потеря работоспособности элемента или оборудования в

целом. Такой отказ называют параметрическим отказом.

Для отказов функционирования характерны быстрое их протекание («лавинообразное» повреждение, разрушение), для параметрических отказов – медленное (примером медленно протекающего процесса, приводящего к потере работоспособности, может служить выход из строя уплотнения затвора вследствие износа, коррозия).

Однако быстро протекающим процессам потери работоспособности также часто предшествуют медленно протекающие процессы накопления элементами оборудования различного рода повреждений.

Существенное значение имеют причины и последствия наступления отказов.

Большинство аварий и повреждений объектов техники связано с действием субъективных факторов надежности, т.е. они часто выступают в качестве причин отказов, которые принято называть производственными причинами.

В зависимости от производственных причин, вызвавших их, отказы делят на конструкционные (проектные), заводские, строительного-монтажные и эксплуатационные [4].

Состояние и работоспособность металлических конструкций могут быть оценены визуально, путем инструментального обследования и путем испытания (апробирования).

Технические осмотры, проводимые эксплуатационным персоналом подразделяют на общие и частные. Общие технические осмотры проводят не менее двух раз в год (в процессе подготовки оборудования к пропуску паводков и в ходе проверки готовности оборудования к зиме). Частные технические осмотры проводят (по мере необходимости) для уточнения состояния отдельных элементов оборудования.

Инструментальные обследования, как правило, проводят после продолжительной эксплуатации оборудования, в случае трудности визуальной оценки его состояния и работоспособности, а также для выяснения причин

возникших эксплуатационных затруднений, уточнения состава и объема мероприятий, направленных на обеспечение (или повышение) надежности металлических конструкций.

Технические средства диагностики используют на всех этапах оценки состояния и работоспособности металлических конструкций. При визуальном обследовании используют простейшие приспособления, такие как измерительная лупа, молоток для отстукивания сварных швов и заклепок, наборы щупов, шаблонов и т.д. При инструментальном обследовании используют более сложные приспособления и приборы, например ультразвуковые дефектоскопы и толщиномеры.

Поддержание в работоспособном состоянии металлических конструкций – это залог долговечной эксплуатации. Долговечность объекта, сооружения зависит от срока службы составляющих элементов. Элементы, составляющие гидротехнические сооружения, могут характеризоваться как одинаковой, так и различной надежностью и долговечностью.

В сооружениях, где составляющие элементы обладают одинаковой долговечностью, капитальный ремонт (при котором восстанавливаются или заменяются вышедшие из строя изношенные элементы) не проводится. В таких сооружениях необходимы профилактические ремонтные работы, поддерживающие надежность на заданном уровне до технического или морального износа. Необходимо принимать меры, чтобы узлы таких сооружений и элементы обладали примерно одинаковой надежностью и долговечностью. Достижение полной идентичности надежности практически невозможно.

Для проведения профилактических ремонтных работ, а также периодического осмотра необходимо, чтобы все элементы и узлы были легко доступны, а выполнение этих работ требовало минимальных затрат труда и средств. Это считается главным условием ремонтпригодности конструкции.

Для установления оптимальной долговечности необходимо исследовать первоначальную стоимость, общие затраты на строительство, ремонт и

содержание объектов гидротехнических сооружений различной долговечности, включая сопряженные капитальные вложения. Следует установить, что выгоднее — более долговечные объекты с большими капитальными затратами и небольшими расходами на обслуживание или дешевые менее долговечные объекты с большими текущими расходами. Этот вопрос должен быть решен на основе технико-экономических расчетов с учетом морального износа и развития технического прогресса [1].

Оптимальная долговечность должна измеряться экономически наиболее выгодным сроком службы, ограниченным физическим и моральным износом. Следует иметь в виду, что учет морального износа приводит не к увеличению, а к уменьшению оптимального срока службы. Физический износ неотвратим. Его размеры во многом зависят от условий эксплуатации. Профилактика и другие мероприятия могут лишь отдалить этот период. Одна часть физического износа возмещается регулярным ремонтом, другая, вызывающая изнашивание, постепенно приводит к выходу из строя объекта. Физическому износу подвергаются не только действующие сооружения, но и не работающие, так как они не изолированы от окружающей среды. Физический износ бездействующих сооружений и установленные на них оборудования наносят народному хозяйству большой вред.

Физическая долговечность промышленных зданий и сооружений находится в пределах 50...100 лет [6].

Высокий уровень надежности и долговечности может быть достигнут только в результате совместной работы проектировщиков и производителей на всех этапах создания, эксплуатации и ремонта объектов. Недостаточная надежность объектов гидротехнических сооружений в ряде случаев обусловлена тем, что надежность и долговечность не относятся к показателям, по которым оценивается работа организации.

Одна из основных задач экономики на современном этапе — улучшение использования производственных фондов. Повышение качества, надежности, долговечности сооружения является первостепенной задачей. Для

регулирования долговечности объекта существует три способа [1]:

- увеличение прочности (сопротивляемости к нагрузкам) объекта;
- уменьшение приложенной к объекту нагрузки;
- уменьшение скорости старения объекта.

Изменением этих трех основных параметров можно регулировать долговечность сооружения.

Прогнозирование надежности и долговечности объектов гидротехнических сооружений – это часть общей проблемы прогнозирования научно-технического прогресса.

Основное уравнение старения, называемое обобщенным уравнением Аррениуса [7], имеет вид:

$$\ln S = \ln S_0 - K''te^{-\frac{Q}{E}}, \quad (1.1)$$

где: S – мгновенная прочность;

S_0 – начальная прочность;

Q – энергия активации;

E – энергия реакции;

K'' – включает в себя константы K и K' и является функцией концентрации веществ, а также их природы;

K – константа, зависящая от материала;

K' – константа, характеризующая размер дефекта.

Из этого уравнения следует, что:

- а) при постоянстве внешней среды прочность объекта уменьшается со временем по экспоненциальному закону;
- б) срок службы объекта до достижения заданной прочности обратно пропорционален концентрации материала среды;
- в) логарифм долговечности объекта, соответствующий определенному

значению прочности, обратно пропорционален энергии среды.

Проведенные исследования показали, что это уравнение справедливо для многих типов материалов при наличии двух независимых процессов начального и долговечного старения.

При приложении нагрузки к элементу, энергия вносимая нагрузкой, приводит к образованию новых слабых звеньев. Таким образом, допуская, что энергия нагрузки участвует в процессе старения, следует считать, что скорость старения зависит от нагрузки и будет меньше при меньших значениях нагрузки. Влияние нагрузки на старение было исследовано на большом количестве материалов. Для многих материалов долговечность уменьшается при всех значениях нагрузки. Вейбулл экспериментально установил (а Б. В. Гнеденко [8] теоретически вывел) уравнение, описывающее долговечность в зависимости от прочности,

$$N = K(S - E)^m, \quad (1.2)$$

где: N – долговечность в циклах;

S – величина приложенной испытательной нагрузки;

E – приведенная полезная прочность;

K, m – приведенные константы.

Уравнение дает более точные результаты, если E выбрано опытным путем. Вейбулл обнаружил, что наилучшее совпадение с опытными данными получается при $E = 5,5 \text{ кгс/см}^2$. Когда $E=0$,

$$N = K \cdot \left(\frac{S_T}{S} \right)^m, \quad (1.3)$$

где: S_T – нагрузка (индекс «т» относится к стандартным или рабочим условиям).

Прочность (или сопротивляемость различным нагрузкам) можно изменить соответствующей обработкой материалов, принятием мер в процессе старения (упрочнение), проведением профилактических ремонтных работ до начальной прочности, изменением влияния среды.

Нагрузки выбирают изложенным выше методом в соответствии с принятым коэффициентом запаса, обоснованной характеристикой надежности и степенью риска.

При проектировании следует предусмотреть возможность проведения ремонта, удобный доступ к отдельным звеньям. Объект должен быть ремонтнопригодным.

На долговечность гидротехнических сооружений и их составных элементов в процессе эксплуатации воздействует ряд факторов (все силы и условия обычно называются факторами) [1]. Различают три группы факторов: основные, сопутствующие и случайные. Основные учитываются в процессе проектирования. Учет сопутствующих факторов также необходим при разработке проектов. Случайные факторы не могут быть учтены в процессе разработки. Две первые группы факторов можно разделить на три основные подгруппы: управляемые, слабоуправляемые и неуправляемые.

Управляемые могут изменяться в процессе разработки. Это – скорости потока, давление, фильтрационный градиент, влажность и т.п. К слабоуправляемым факторам следует отнести износ, размыв, коррозию, подъем грунтовых вод и т. п. Действие их можно уменьшить с помощью специальных мер защиты.

К неуправляемым факторам относятся физические и химические процессы, происходящие в материалах конструкции, большинство процессов старения, изменение физических свойств материалов и т.п.

Различают две среды влияния на долговечность сооружений – внешнюю и внутреннюю. Внешняя среда находится в рабочем пространстве сооружения. Она может быть газообразной или жидкой. Внутренняя среда находится в

объеме, окружающем ограниченное количество элементов. Защита от воздействия внешних факторов необходима для обеспечения нормальной работы объекта при эксплуатации или при простоях [1].

Одной из основных причин снижения долговечности металлических конструкций является разрушение металлов от коррозии.

Коррозия (от лат. *corrosio* – разъедание) – это самопроизвольно протекающий процесс разрушения металла, вызываемого его окислением, вследствие химического или электрохимического взаимодействия металла с окружающей средой.

Из-за коррозии многие ценные свойства металлов утрачиваются. Их прочность и пластичность уменьшается. При этом, в результате поломки какой-нибудь небольшой детали из строя могут выйти целые агрегаты, машины и сооружения. Свойства поверхности деталей при коррозии ухудшаются, изменяются и их размеры. Нарушается герметичность аппаратов. Трение между движущимися в соприкосновении частями машин возрастает. Наконец, отметим, что при коррозии ухудшаются электрические и магнитные свойства металлов [9].

Ежегодные потери металла из-за неудовлетворительной защиты от коррозии металлических конструкций и незначительного применения атмосфероустойчивой стали составляют не менее 3% всего объема применяемых конструкций. Приблизненные расчеты показывают, что около 10-12% добываемого металла безвозвратно теряются на коррозионное распыление, т.е. каждая восьмая домна «работает на коррозию». Скорость коррозии от 0,1 мм в год и более опасна для конструкций, так как она уменьшает толщину и площадь сечения на 40-100% и выводит сооружение из строя [10].

В различного рода щелях и других узких местах образовывается местная коррозия в виде раковин, которая может представлять опасность для несущей способности элемента конструкции (местная коррозия). Объем продуктов коррозии резко увеличивается при увлажнении, что может привести к одному из видов коррозионного разрушения – расслоению. Распирающее действие

продуктов коррозии может вызвать отрыв связующих заклепок или сварных швов. Проблема повышения долговечности металлических конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах требует комплексного решения.

При проектировании конструкций, работающих в агрессивных средах, следует учитывать комплексный показатель коррозионной стойкости элемента [11]:

$$P_{кор} = (V_{Ст.3} / V_{факт}) \cdot \left(\frac{\delta}{K_{из}} \right), \quad (1.4)$$

где: $P_{кор} \geq 0,6$ для среднеагрессивной среды и $P_{кор} \geq 0,8$ – для агрессивной;

$V_{Ст.3}$ – скорость коррозии малоуглеродистой стали в данной среде;

$V_{факт}$ – то же, проектируемой стали с учетом качества эксплуатации;

δ – толщина сечения элемента, см;

$K_{из}$ – коэффициент износа, зависящий от формы поперечного сечения элемента и его положения в пространстве.

Полученные результаты дают возможность прогнозировать изменение несущей способности и надежности конструкций в агрессивных средах, а следовательно, и обеспечивать требуемую надежность и долговечность конструкций.

При осмотре металлоконструкций определяют характер и вид их повреждения – коррозионный (сплошной, язвенный), кавитационный, абразивный. При обнаружении на элементах металлоконструкций вмятин, других местных деформаций измеряют их глубину, например, для затворов шлюзов. Неопасными считают вмятины глубиной до 20 мм, если они не нарушают работу уплотнительного контура или других взаимосвязанных элементов оборудования.

В местах возможного нахождения дефектов поверхность металла очищают металлическими щетками, скребками от ржавчины, наслоений,

очищенные места, осматривают. Особое внимание следует обращать на места концентрации напряжений, например пересечения продольного и поперечного набора, резкого изменения площади поперечного сечения несущих элементов, сварные швы, заклепочные, болтовые соединения. При этом следует учитывать, что такие дефекты, как очаги коррозионного, кавитационного или абразивного повреждения при небольших размерах могут не оказывать значительного влияния на работоспособность конструкции, трещина же любого размера способна в определенных условиях развиваться без приложения нагрузки. С учетом этого в местах возможного нахождения трещин рекомендуется после зачистки производить травление поверхности металла 1%-ным раствором азотной кислоты с последующей нейтрализацией 3-5%-ным раствором соды и промывкой водой. Кислота проникает в трещины и другие дефекты, и они выделяются рельефно. После этого сомнительное место осматривают через лупу [4].

Вопросы борьбы с коррозией остаются весьма актуальными. Продолжительность межремонтного периода эксплуатируемых зданий и сооружений составляет от 1 до 3 лет, при этом заново окрашивается около 75% заложенного в них металла [12]. Для снижения потерь в результате коррозии и повышения тем самым долговечности сооружений вопросы об их защите должны решаться еще на стадии проектирования с тем, чтобы при строительстве применялись конструкции с головными защитными покрытиями, выполняемыми в заводских условиях.

Исследованием и разработкой в этом направлении занимались Мирцхулава Ц.К., Фрейшист А.Р., Мартенсон И.В., Розина И.Д., Лашенко М.Н., Абросимов В.Г., Бандин О.Л., Гусенков А.П., Когаев В.П., Гавриш В.С., Простак В.Ф., Химин В.Н.

Значительный вклад в развитие по исследованию коррозии металлических конструкций гидротехнических сооружений внесли учёные: Томашов Н.Д., Ханларова А.Г., Трифель М.С., Штерн Е.П., Ахмедов Г.М., Масольд В.Я., Кочетков Ю.А., Спиринов А.А., Шихалиев Ю.З., Складнев М.Ф.,

Эдель Ю.У., Налимов С.М., Рейзин Б.Л., Стрижевский И.П., Рощина З.В., Кузнецов В.В., Вержбицкая Л.В., Кадек В.М., Габов Н.И., Айвазов Б.Ю., Карпенко Г.В., Улиг Г.Г., Ревя Р.У.

Среди казахстанских ученых, занимавшихся исследованиями в данных областях, следует выделить Алимбаева Б.А.

1.2 Анализ разрушений, аварий и катастроф металлических конструкций гидротехнических сооружений

Для разработки научно обоснованных методов повышения надежности различных сооружений необходим анализ отказов этих сооружений или их составных частей. Все отказы должны анализироваться согласно теории надежности, как для разработки обоснованных приемов их прогноза, так и для разработки мероприятий по предотвращению этих отказов. Это дает возможность получения информации, на основе которой корректируют нормы проектирования, правила изготовления и монтажа, совершенствуют методы конструирования, технологические процессы и эксплуатацию.

В истории строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений имеются случаи аварий и отказов из-за снижения надежности. Приведем краткое описание некоторых из них, чтобы показать чрезвычайную важность соблюдения правил надежности.

В январе 1949 г. на одной из станций Арменэнерго произошла крупная авария: на расстоянии 60 м от здания ГЭС, у анкерной опоры № 2, где напор равен 163 м, разорвался напорный трубопровод диаметром 2 м. Труба у здания станции для питания двух агрегатов имеет две ветви с расходом 10 м³/сек каждая [13].

Услышав характерный звук, сопровождающий разрыв в воздушной трубе разорванного трубопровода, и заметив резкое понижение горизонта воды в напорной камере, дежурный мастер гидроцеха без промедления сбросил плоский затвор напорной камеры. Сброс был произведен через 2...3 мин. после разрыва, что предотвратило дальнейшее развитие аварии, и особенно больших

повреждений не последовало. Воздушной волной были выбиты стекла и фрамуги окон главного здания, обращенные в сторону трубопровода, а потоком воды было залито турбинное помещение. Осмотром разорванного трубопровода (рис. 1.1) установлено, что разрывы произошли как по продольному и поперечным швам, так и в местах отсутствия швов; общая длина повреждения 17,2 м.

Восстановление разорванного участка напорного трубопровода потребовало больших затрат и привело к невыработке электроэнергии. В течение 3 мес., пока производилась замена поврежденного участка, два агрегата, питающиеся от этого трубопровода, простояли.

Указанная авария вызвала необходимость организовать тщательное исследование напорных трубопроводов с привлечением к этой работе ряда организаций.

Основные причины аварии:

1. Толщина стенки трубопровода была меньше расчетной. Вся внутренняя поверхность трубопровода была покрыта наростами, которые с трудом отделялись от поверхности, причем под ними обнаруживались небольшие язвы, уменьшающие толщину стенок трубопровода.

При исследовании целости обечаек установлено, что внутренняя поверхность напорных трубопроводов вследствие коррозии была неровной, отклонения в толщине стенки составляли 2...3 мм. Проверочные же расчеты по действующим нормам показали, что в расчетной толщине стенки трубопровода запас на коррозию взят на 1 мм меньше. Этот факт свидетельствует о перенапряжении и уменьшении запаса прочности оболочки трубопровода.

2. Наличие недоброкачественных сварных соединений и применение поперечных накладок. Было установлено, что 60% проверенных швов имеют дефекты разного вида. Во время разрыва все накладки отлетели, за исключением двух, по которым произошел продольный разрыв.



Рис. 1.1. Вид разорванного трубопровода

Другим следствием недоброкачества и неправильной конструкции сварных швов является трещина, появившаяся зимой 1946 г. по поперечному сечению по середине кольцевой накладки на другой нитке напорного трубопровода той же станции. Указанная кольцевая накладка, наложенная снаружи трубопровода, путем наружных и внутренних сварных швов соединяла одну часть трубы с другой.

Вследствие близости расположения друг от друга внутренних и внешних сварных швов в средней части накладки появилось перенапряжение термического характера, что привело к образованию трещины. Повреждение произошло внутри здания станции при заполненном трубопроводе, когда агрегат находился в нерабочем состоянии.

3. Усиленная вибрация напорных трубопроводов. Известно, что все работающие трубопроводы вибрируют в процессе своей работы из-за пульсации потока, но вибрация трубопроводов на указанной ГЭС была особенно значительной.

Систематические измерения величины амплитуды вибрации на всех нитках трубопровода при разных режимах работы агрегатов и разной

температуре окружающей среды показали, что при определенных режимах в некоторых точках имеет место значительное повышение вибрации, выходящее за пределы шкалы измерительного прибора - 0,4 мм. Такая вибрация чувствительна на расстоянии, от нее слышен шум в ходовых частях.

Было установлено, что увеличение амплитуды вибрации трубопроводов связано с кавитационными режимами, которыми вызывается резкое увеличение колебания внутреннего давления в напорных трубопроводах, что в свою очередь обуславливает появление переменных напряжений в оболочке, достигающих до 250 кг/см². Отметим, что для уменьшения кавитационных разрушений рабочие колеса турбин были заменены новыми модернизированными колесами. Очевидно, при старых рабочих колесах из-за интенсивных кавитационных явлений величина переменных напряжений в оболочке напорных труб была значительно выше.

Таким образом, указанные переменные напряжения, накладываемые на напряжения от основных сил, вызывают развитие усталостных явлений в отдельных местах трубопровода и способствуют его ослаблению.

4. Нарушение нормального положения ходовых частей промежуточных опор. Измерением зазоров между катками и опорной поверхностью на промежуточных опорах выяснилось следующее:

а) имеются случаи отставания поверхности промежуточных опор от опорных роликов, что приводит к удвоению пролета между опорами с соответствующим ростом напряжений;

б) от интенсивной вибрации трубопровода нарушается, видимо, нормальное положение катков в плане, что увеличивает коэффициент трения с соответствующим ростом напряжений примерно на 35 %;

в) бывают случаи загрязнения ходовых частей промежуточных опор, что также увеличивает коэффициент трения.

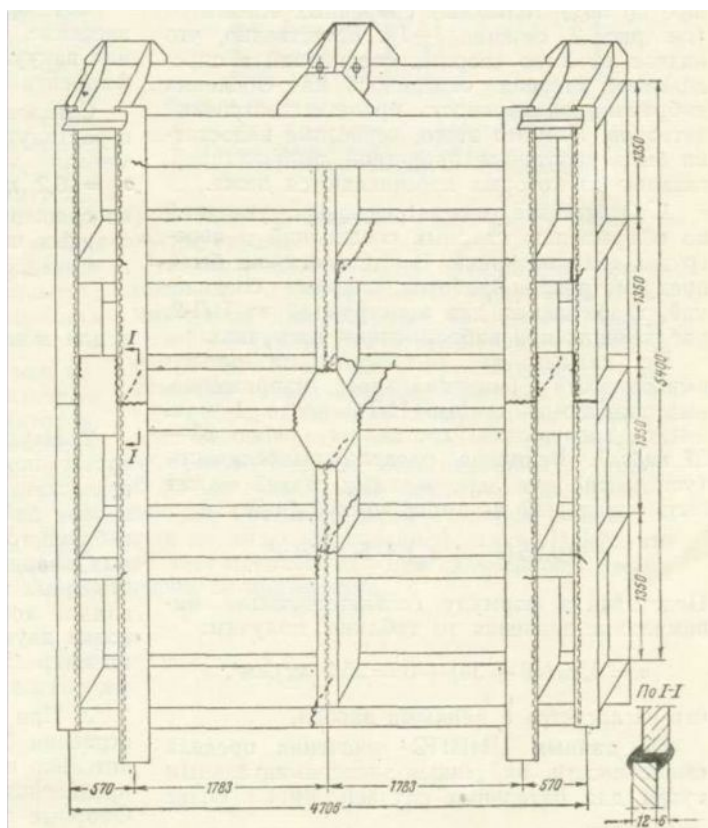
Наблюдения показывают, что изменения в ходовых частях промежуточных опор непостоянны. Так, например, первый замер показал наличие косога зазора, т. е. поверхность промежуточной опоры с одной

стороны отстает. Следующий замер на тех же опорах показал отсутствие зазора или наличие его с обеих сторон и т. д.

Надо полагать, что эти явления обуславливаются вибрацией и изменением температуры окружающей среды.

В конце навигации на одном из судоходных шлюзов было обнаружено повреждение затвора водопроводной галереи [14].

Затвор плоского типа (рис. 1.2) перекрывает донное отверстие размером 3,5x5,7 м в свету и имеет сварную конструкцию пролетного строения, состоящую из пяти ригелей, выполненных из прокатного двутаврового профиля №55а с усиливающей полосой в растянутом поясе, опорных стоек двухстенчатого сечения и диафрагмы, выполненных из листовой стали. Давление воды передается на устои сооружения при помощи четырех безбалансирных колес. Материал конструкции пролетного строения затвора Ст.НЛ-2.



Жирными линиями показаны образовавшиеся трещины

Рис. 1.2. Общий вид затвора (перспектива)

Повреждение затвора заключалось в образовании поперечных разрывов и трещин в середине пролета растянутых поясов и стенок четырех нижних ригелей (рис. 1.2), начинавшихся по сварным швам. Разрывы в монтажных стыках и трещины были обнаружены и на растянутых поясах внутренних половин опорных стоек и диафрагмы. Вследствие потери несущей способности балочной клетки затвора пролетное строение прогнулось внутрь на 135-150 мм.

Для выявления причин разрушения затвора были подняты и осмотрены еще четыре затвора. При осмотре было установлено, что три из них также имели микроскопические трещины. Как установлено, причины разрушения заключались в недостаточной стойкости запроектированных конструкций при вибрационных нагрузках.

Необходимо отметить неблагоприятные условия эксплуатации затворов: длительный режим работы в полуоткрытом состоянии, что проектом не предусматривалось; отсутствие осмотра на протяжении двух навигаций, вследствие чего полностью исчезла окраска затворов, и металл подвергся сильной коррозии. Последнее обстоятельство нередко приводит к снижению вибрационной прочности легированных сталей в воде.

Таким образом, основными причинами повреждения затворов являются недостаточный учет при проектировании всех факторов, влияющих на прочность затвора, и несоблюдение режима сварки при изготовлении конструкций, а также тяжелые условия, в которые были поставлены затворы в процессе эксплуатации.

В дальнейшем было предложено изготовить взамен разрушенного пролетного строения новое, изготовленное из обычной нелегированной стали. Это предложение на основании изложенного выше представляется недостаточно обоснованным, так как известны случаи разрушения в аналогичных условиях и по тем же причинам конструкций затворов, изготовленных из нелегированных сталей. В то же время надо отметить удовлетворительное состояние ряда затворов, выполненных из низколегированной стали НЛ-2, что создает предпосылки для дальнейшего расширения ее применения.

В марте 1952 г. на одной из бетонных водосливных плотин на р. Свири в период временной эксплуатации произошла авария плоского колесного затвора пролетом 27 м, рассчитанного на напор 6,6 м [15]. Затвор был запроектирован по техническим условиям и нормам 1935 г., конструкция выполнена сварной из стали марки Ст.3, электроды типа Э42 (обмазка ЦМ-7). Механические свойства и химический состав стали соответствовали нормативным требованиям. За три месяца до аварии затвор был установлен в пазах ремонтного затвора и работал под напором 6,0-6,5 м; в момент аварии действующий напор составлял 5,72 м. За неделю до аварии в районе строительства наступило резкое похолодание, температура ночью падала до – минус 30°C, в момент аварии температура воздуха составляла – минус 22°C.

Авария произошла при закрытии соседнего пролета плотины. Работающие на бычке слышали шум, скрежет, ощутили толчок и увидели, что обшивка затвора сильно прогнулась в сторону нижнего бьефа. Затем сначала левый, потом правый конец затвора были вырваны из пазов, и затвор потоком воды прибило к правобережному устью. При осмотре разрушенного затвора были обнаружены: разрыв низового пояса ригеля в месте его перелома (на расстоянии около 1/3 пролета от левой опоры), вертикальные и горизонтальные разрывы и выпучины на обшивке, большие деформации верхней консоли затвора, разрывы решетчатых стоек. Балансирные тележки были сорваны. Установлено также, что сварка монтажного стыка низового пояса ригеля в месте его перелома была выполнена с грубыми нарушениями технических условий.

Как выяснилось, зимой перед затвором поддерживалась небольшая майна, однако на ригеле и особенно торцах затвора имелись наледи, а на обшивке толщина льда доходила до 40 см. Околка льда не производилась.

Расчетные нормальные напряжения в поясе ригеля в месте разрыва при действии напора 5,72 м составляли всего 830 кгс/см². При вмерзании в пазовые наледи балансирных тележек и опорно-концевых стоек затвора понижение температуры воздуха, предшествовавшее аварии, могло вызвать

дополнительные растягивающие напряжения порядка 250-400 кгс/см². Суммарные напряжения – 1200 кгс/см² сами по себе невелики, однако в данном случае имела место «двойная» концентрация напряжений: конструктивная - вследствие перелома пояса ригеля и технологическая - вследствие непровара стыкового шва. Известно, что при отрицательной температуре ниже порога хладноломкости стали это может вызвать хрупкое разрушение при рабочих напряжениях всего 600-1200 кгс/см². В данном случае для стали Ст. 3сп при толщине свыше 30 мм температура порога хладноломкости $T_k = -20^{\circ}\text{C}$, т.е. $T_{ав}$ ниже T_k .

При этом условии уровень напряжений, при котором происходит распространение возникшей хрупкой трещины, составляет всего $0,25 \dots 0,3\sigma_t$, или не более 700 кгс/см².

Таким образом, установлено, что некачественное выполнение стыкового шва в растянутом поясе ригеля создало в этом месте опасный концентратор напряжений – источник хрупкого разрушения. Суровый зимний режим и ледовые условия способствовали появлению и развитию хрупкой трещины в месте упомянутого концентратора. Непосредственным импульсом к возникновению аварии явилось, по-видимому, некоторое повышение уровня воды перед затвором при закрытии соседнего пролета, так как даже незначительной дополнительной нагрузки достаточно для разрушения аварийного сечения, находящегося в опасном напряженном состоянии.

При сходных обстоятельствах в январе 1958 г. произошло разрушение одного из восьми затворов водосливной плотины на одной из сибирских ГЭС [15]. Колесный двухригельный затвор пролетом в свету 20 м с расчетным напором 11,0 м, сварной конструкции из стали Ст.3 находился в строительных пазах. Электрообогрев затворов, предусмотренный для постоянной эксплуатации, при работе их в строительных пазах не был установлен. За осенне-зимний период 1957-1958 г.г. со времени ледостава (при температуре – минус 4°С) и до момента аварии ($T_{ав} = -24^{\circ}\text{C}$) никаких защитных мер против обледенения затворов не принималось, перед ними лишь постоянно

поддерживалась майна. Минимальная наблюдавшаяся температура воздуха за этот период составила – минус 38,6°С. К моменту аварии все затворы имели мощные наледи с верховых и низовых сторон. Большие призмы льда намерзли также между металлоконструкцией затвора и бетоном бычков, образуя ледовые припои. Особенно сильные наледи были на пострадавшем затворе. Авария произошла во время сколки льда: раздался сильный треск, одновременно большие глыбы льда откололись от затвора, а сам затвор начал вибрировать. При осмотре затвора было обнаружено, что на расстоянии примерно 8 м от левой опоры низовой пояс верхнего ригеля пересекла сквозная трещина, захватившая участок стенки ригеля от пояса до заваренного монтажного отверстия. Отверстие имело неровную кромку, и было заварено вставку встык некачественными швами (с просветами).

Как и в предыдущем случае, здесь очагом хрупкого разрушения при низкой температуре явился концентратор напряжений. Непосредственным импульсом к разрушению послужила сколка льда с затвора.

Наличие опасных концентраторов напряжений и суровые климатические условия привели к появлению трещин на затворах водослива одной из ГЭС на р. Каме [15]. Трещины были обнаружены на нескольких затворах в 1963 г. через несколько лет после начала эксплуатации. Они начинались главным образом в швах или около швов, соединяющих низовой пояс ригеля с поясом опорной стойки, и распространялись на металл ригелей и стоек. Характерно, что некоторые из поврежденных затворов в тот период, когда могли появиться трещины, не воспринимали гидравлическую нагрузку (в последующие годы повреждения аналогичного характера отмечались в меньшем количестве на затворах других ГЭС на р. Каме и Волге). Здесь имело место резкое, без закругления примыкание поясов под прямым углом друг к другу, которое для углеродистой стали характеризуется величиной эффективного коэффициента концентрации напряжений $\beta=2,5$, т.е. такие узлы имеют весьма низкую усталостную прочность. Вдобавок к неудачному конструктивному оформлению в ряде случаев было ей обнаружено низкое качество сварки – непровары,

подрезы, швы не доведены до конца из-за отсутствия выводных планок.

В данном случае суровые температурные условия были усугублены тем, что в связи с отсутствием обогрева пазов и порога большинство затворов были приморожены к пазам вследствие плохой работы боковых уплотнений, а нижние секции из-за плохой работ межсекционных уплотнений заполнены льдом и приморожены к водосливу с низовой стороны.

С работой в тяжелых зимних условиях при температурах ниже – минус 30°C также была связана авария затвора мусоросбросного пролета другой водосливной плотины на р. Каме [15].

Затвор плоский, скользящий, сдвоенный, типа «Глаголь» с пролетом 20 м и расчетным напором 10,5 м был выполнен сварным из сталей марок М16с и Ст.3сп. Весной 1963 г. были обнаружены следующие повреждения верхней (Г-образной) секции затвора:

- а) трещины на обшивке в зоне швов, прикрепляющих стрингеры к обшивке;
- б) отрыв в некоторых панелях обшивки от стрингеров.

Повреждения были сосредоточены преимущественно в средней части пролета затвора на одном уровне во всех панелях. Кроме того, на нижней секции была обнаружена трещина в монтажном шве обшивки, выходящая на основной металл. Установлено, что причиной разрушения верхней секции явилось давление ледяного поля на затвор вследствие нарушения правил эксплуатации (зимой перед затвором не поддерживалась майна). Повреждения были устранены: верхняя секция заменена новой, нижняя – отремонтирована.

Зимой 1968 г. произошло вторичное повреждение нижней секции затвора. Напор на затвор составлял около 10 м, температура воздуха – минус 33°C, причем за три предшествующие дня она упала на минус 27°C.

Это повреждение сопровождалось резким звуком, после чего появилась сильная фильтрация по нижнему уплотнению и между секциями. На всю высоту нижней секции произошел разрыв низовой обшивки, низовых поясов и стенок ригелей посередине пролета. Раскрытие трещины со стороны нижнего бьефа достигало 270 мм. Со стороны верхнего бьефа была заметна деформация

обшивки со стрингерами. Большая часть разрыва проходила по основному металлу элементов и носила хрупкий характер. Часть разрыва шла по стыковому шву. В районе верхнего ригеля на участке шва обшивки длиной около 200 мм характер поверхности излома свидетельствовал о наличии в этом месте старой трещины.

Механические испытания металла показали неудовлетворительную ударную вязкость стали при температуре – минус 20°C, а особенно при – минус 40°C. Таким образом, основными причинами аварии были признаны:

- а) наличие старой трещины, сыгравшей роль концентратора напряжений. Трещина, очевидно, возникла вследствие неудачной технологии заводской сварки: листы нижней обшивки заваривались односторонним швом с неглубоким проваром уже после того, как они были приварены к мощному поясу ригеля толщиной 30 мм. Это увеличило жесткость соединения и сделало невозможным термические деформации металла;
- б) неудовлетворительная ударная вязкость металла при отрицательных температурах;
- в) резкое понижение температуры в период, предшествовавший аварии.

Следующий аварийный случай произошел также в зимний период при временной эксплуатации основного затвора донного водосброса одной из ГЭС на р. Волге [15]. Скользящие глубинные затворы 12,0x8,6 м сварной конструкции из стали М16С оборудованы откидными подхватами для установки на разных уровнях при частичном открытии отверстия. Маневрирование производилось краном с захватной балкой. При очередном маневрировании затвор, сорвавшись с подхватов до сцепления с захватной балкой, упал на порог с высоты 4,35 м, при этом произошел сплошной излом полотнища затвора на всю высоту примерно посередине пролета. Поток воды затвор был вынесен из пазов и упал на бетонную плиту у выхода из отсасывающей трубы.

Осмотр разрушенного затвора показал:

- а) характер излома всех элементов хрупкий;

б) разрушений по сварным соединениям нет;

в) вне зоны излома местные или общие прогибы элементов отсутствуют.

Непосредственной причиной падения затвора явилась, по-видимому, плохая его постановка на подхваты. В данном случае водосбросы работали зимой при низших отметках нижнего бьефа (проектом это не предусмотрено), что могло привести не только к засорению, но и к обледенению гнезд подхватных гребенок.

В результате падения затвор быстро перекрыл отверстие водовода, что привело к возникновению гидравлического удара. При этом, как показали проделанные расчеты, нагрузка могла достигнуть величины, намного превышающей расчетную, к тому же она была приложена с динамическим эффектом. Хрупкий характер разрушения косвенно подтверждает предположение о большой скорости нарастания нагрузки. Как видим, самопроизвольное опускание в поток затвора, установленного в длинном напорном водоводе, приводит к возникновению весьма значительных неprojektных воздействий. Поэтому конструкция оборудования (захватных балок, штанг, подхватов и пр.) и эксплуатационные мероприятия должны исключать возможность самопроизвольного падения затвора.

Во всех остальных рассмотренных случаях действующие гидравлические нагрузки не превышали расчетных, однако вследствие вмерзания затворов менялась их расчетная схема, и появлялись дополнительные температурные напряжения. Почти все разрушения происходили при низких температурах и имели хрупкий характер, поскольку примененные стали, при таких температурах теряли свои пластические свойства. В каждом случае имелся концентратор – начальный очаг разрушения, который был, так или иначе, связан с выполнением сварных соединений (образование горячих трещин вследствие неудачной технологии, отсутствие должного контроля за качеством монтажной сварки, отсутствие выводных планок, подрезы, непровары, заварка встык монтажных отверстий) [15].

Особое внимание при проектировании следует уделять вопросам работы

затворов в период строительства, когда возникают наиболее тяжелые условия для их эксплуатации.

Опыт возведения и эксплуатации механического оборудования Усть-Каменогорской, Мингечаурской, Волжской им. В.И. Ленина и других гидроэлектростанций показал, что уже при напорах на затворы 20-40 м наблюдаются повреждения облицовок, закладных пазовых частей затворов и их опорных и уплотняющих частей, вызванные недоучетом при проектировании воздействия на них высокоскоростного потока при определенных режимах эксплуатации затворов [16].

Обследование механического оборудования действующих объектов специалистами конструкторских бюро треста «Гидромонтаж» проводилось практически с момента их создания. Только в 1983-1984 г.г. рекомендации по проведению ремонтов механического оборудования, необходимости его реконструкции или модернизации были даны по 34 ГЭС или каскадам ГЭС, 16 тепловым и одной атомной электростанциям. В частности было рекомендовано выполнить реконструкцию механического оборудования (в целом или отдельных элементов) Кегумской, Горьковской, Каратальской ГЭС, каскадов Мингечаурских, Ташкентских, Пазских, Орджоникидзевских и Алма-атинских ГЭС, Плявиньской ГЭС, каскада №1 Ленэнерго [17].

В результате обследования механического оборудования было выявлено следующее [17]:

1. Механическое оборудование длительно эксплуатируемых гидроузлов, таких как Земоавчальская, Айрумская, Кегумская ГЭС, каскады Бозсуйских и Шаори-Ткибульских ГЭС имели большой физический износ и морально устарели. Оно часто не обладало требуемой надежностью, его эксплуатация требовало больших затрат ручного труда, а ремонт не всегда был достаточно эффективным. На упомянутых, а также на ряде других гидравлических и тепловых электростанциях требовалась частичная или полная реконструкция или замена механического оборудования.

Опыт эксплуатации «старых» гидроузлов показывает, что даже при

соблюдении правил эксплуатации и своевременном проведении плановых ремонтов через 40-50 лет эксплуатации элементы затворов, кранов, стационарных приводных механизмов вследствие физического износа, морального устаревания в большинстве подлежат полной или частичной замене из-за снижения безотказности их работы (каскад Нижне-Бозсуйских ГЭС-выход из строя гидравлически уравновешенных клапанных затворов). Причем, при неблагоприятных условиях уже через 15-20 лет эксплуатации может потребоваться проведение реконструкции или капитального ремонта электрической, механической части оборудования, его опорно-ходовых частей (Волжская ГЭС им. В. И. Ленина – необходимость замены электрической части козловых кранов). Сороудерживающие решетки, насколько можно судить из опыта эксплуатации, имеют срок службы порядка 10-15 лет.

2. На большинстве обследованных электростанций наблюдается недостаточный объем ремонтного и технического обслуживания механического оборудования, что приводит к снижению эксплуатационных показателей оборудования и повышенному износу его элементов. Кроме того, на большей части гидроузлов «старой» постройки и некоторых гидроузлах постройки 1950-1960-х годов (например, на Волжской ГЭС имени В. И. Ленина) оборудование для антикоррозионных и ремонтных работ имеет не достаточную мощность, нередко отсутствуют специальные помещения для проведения ремонтных и антикоррозионных работ, что затрудняет их выполнение в зимний период, снижает качество ремонта.

Часто эксплуатационный персонал ограничивается лишь декоративной окраской металлоконструкций или вообще не окрашивает их на протяжении десятков лет. Например, на каскаде Нижне-Бозсуйских ГЭС некоторые затворы, расположенные в труднодоступных местах, длительное время не окрашивались, что привело к снижению их несущей способности. Это говорит о том, что персонал некоторых электростанций относится к механическому оборудованию как к второстепенному, не участвующему в выработке электроэнергии, и состояние которого не влияет на экономические показатели

энергопредприятия. Не всегда обслуживающий персонал имеет квалификацию, достаточную для того, чтобы правильно организовать эксплуатацию и ремонт механического оборудования, что нередко приводит к его отказу. Существенные недостатки в эксплуатации и ремонте механического оборудования чаще всего выявляются на тепловых электростанциях и ГЭС небольшой мощности. Так, на одной из ТЭС из-за недостаточного внимания к обслуживанию механического оборудования гидроузла водохранилища технического водоснабжения колесные опоры не смазывались с начала эксплуатации. В результате произошел отказ колесных опор затворов, вызвавший перегрузку козлового крана и повреждение его пролетного строения.

3. На многих ГЭС, даже расположенных в сравнительно мягких климатических условиях, нередко возникают зимние затруднения: обмерзание затворов и их закладных частей, троллей козловых кранов, подкрановых тепла в водохранилище путем рациональной установки льдом сороудерживающих решеток, выпучивание облицовок, загустевание масла в редукторах приводных механизмов и т. д. Большая работа по обобщению опыта зимней эксплуатации проводилась специалистами СКВ «Ленгидросталь», результаты которой находили отражение в руководящих и нормативных материалах и стандартах предприятия треста «Гидромонтаж».

Намерзание льда на металлоконструкции затворов и их примерзание к закладным частям представляет большую опасность, так как исключается возможность аварийного открытия отверстий водосброса. Попытки поднять примерзшие затворы нередко приводят к выходу из строя элементов привода, уплотнений, а иногда и повреждению опорно-ходовых частей затворов, как это было на Камской ГЭС при попытке подъема затворов строительного периода.

Обмерзание поверхностных затворов нередко происходит в результате перехлестывания воды через затворы вследствие форсировки уровня верхнего бьефа в осенний период, выполняемой по указаниям диспетчерских уравнений с целью увеличения выработки электроэнергии, особенно если запас высоты

затворов недостаточен или перед ними отсутствуют волногасители (Волжские ГЭС, Камская, Горьковская, Новосибирская, Братская, Кременчугская, Каневская и др.). Для затворов глубинных водосбросов, не подтопленных со стороны нижнего бьефа, эффективным способом устранения обмерзания является устройство со стороны нижнего бьефа утеплительных щитов, поднимаемых перед работой водосброса. Для поверхностных затворов вместо широко практикуемой шлаковки уплотнений целесообразно шире использовать установку ниже основного уплотнения дублирующего, которое уменьшает обмерзание за счет организованного отвода протечек по полости между уплотнительными контурами.

Как показывает опыт эксплуатации механического оборудования поверхностных водосбросов Усть-Каменогорской и ряда других ГЭС, расположенных в сравнительно суровых климатических условиях, установка на затворах утепляющей обшивки без применения обогрева не устраняет обмерзания затвора и закладных частей. В большинстве случаев удается отказаться от утепляющей обшивки затворов, уменьшая обмерзание металлоконструкций и закладных за счет использования запасов тепла в водохранилище путем рациональной установки устройств для поддержания майны (барботажной установки или потокообразователя). Применяемые системы обогрева закладных частей затворов, закладываемые в бетон, имеют низкую ремонтпригодность, так как ремонт их рабочих элементов практически невозможен; кроме того, применяемые устройства для обогрева еще недостаточно эффективны. Как показывают результаты обследований к концу 1985 г., около 30% установленных на гидроузлах систем обогрева работали неэффективно (в частности, на Мамаканской и Вилюйской ГЭС) или вообще не работали. На некоторых гидроузлах обогрев проектом предусмотрен не был, однако в процессе эксплуатации выявилась необходимость его установки. В частности, из-за отсутствия обогрева отмечалось забивание решеток шугой на Рыбинской, Серебрянской ГЭС-2, на Днепрогэс им. В. И. Ленина и в ряде других гидроузлов. Необходимо продолжить поиск более

надежных способов обогрева закладных частей, обладающих достаточной ремонтпригодностью (передвижные теплогенераторы, тепловыделяющие элементы, наклеиваемые на закладные, и др.).

4. На «старых» гидроэлектростанциях выявлено большое число недостатков проекта механического оборудования, однако в настоящее время они в основном уже не представляют большого интереса для проектировщиков, так как касаются уже не используемых в современных проектах типов механического оборудования или конструктивных решений.

На большинстве гидроузлов вопросы надежности и удобства эксплуатации находят должное конструктивное отражение. Однако, известно немало случаев, когда даже на вновь строящихся гидроузлах затруднения при эксплуатации и недостаточная надежность (в первую очередь недостаточная ремонтпригодность) механического оборудования вызваны недостаточно продуманными компоновочными и конструктивными решениями, недостаточным учетом, а чаще трудностью достоверного учета при проектировании особенностей условий его будущей работы, возможности возникновения в процессе строительства или эксплуатации гидроузла неблагоприятной для работы механического оборудования ситуации.

5. На некоторых даже давно действующих гидроузлах обнаружены строительно-монтажные недоделки, дефекты изготовления и монтажа, а также отсутствие части аварийно-ремонтного оборудования (Вилюйская ГЭС-1, Зейская, Токтогульская ГЭС), что свидетельствует о снижении качества приемки оборудования в эксплуатацию. Оборудование часто сдается без опробования и без испытания под нагрузкой.

Наблюдаются большие просадки затворов и водоприемников и водосбросов (Чарвакской, Бухтарминской, Кегумской, Токтогульской ГЭС и др.) вследствие неудовлетворительной работы манжетных уплотнений в поршнях и уплотнений штока с гидроцилиндром, а иногда протечек в болтовых стыках гидроцилиндров.

Необходимо усилить контроль качества и авторский надзор за

изготовлением и монтажом механического оборудования и гидротехнических стальных конструкций.

6. Повышению качества эксплуатации способствует создание типовых инструкций.

На Канакерской ГЭС Нижне-Разданского каскада подача воды из открытой деривации к турбинам осуществляется стальными свободно лежащими напорными трубопроводами диаметром 2,15 и длиной 432 м, расчетный напор с учетом гидравлического удара на нижнем конце трубопровода составляет около 200 м, толщина стенки 19 мм. Трубопроводы проложены на анкерных и промежуточных катковых опорах, спускаясь по крутому склону от щитовой стенки напорного бассейна к зданию станции. Для трубопроводов была применена импортная малоуглеродистая сталь, по своим характеристикам близкая к отечественной Ст.2. Сооружение трубопроводов осуществлялось в 1930-е г.г., когда уровень развития сварочной техники в строительстве был недостаточно высок. Для стыков оболочки были приняты необычные с современных позиций конструктивные решения: каждый продольный заводской стык оболочки дополнительно усилен снаружи несколькими поперечными накладками прямоугольной формы, обваренными по контуру; кольцевые стыки выполнены на наружных стыковых накладках угловыми швами [18].

В январе 1949 г. во время остановки первого агрегата произошла авария на нижнем участке трубопровода №1 выше второй анкерной опоры. После отключения генератора во время остановки турбины с открытием холостого водовыпуска произошел разрыв оболочки турбинного трубопровода, следствием чего было затопление турбинного помещения с повреждением генераторных выводов двух агрегатов. В результате аварии имело место отключение энергетической мощности 56 тыс. кВт, аварийный недоотпуск энергии 29 800 кВт•ч. Разрыв оболочки произошел в зоне кольцевого стыка, ближайшего к анкерной опоре №2, и распространился вверх по трубопроводу на длину примерно 17,2 м, т.е. до второй промежуточной опоры.

При расследовании аварии было установлено, что гидравлический удар при остановке турбины был меньше расчетного, т.е. не мог явиться причиной разрыва. Экспертиза материала и сварных соединений оболочки показала, что сталь имела расслои, были обнаружены следы старых трещин с внутренней стороны оболочки глубиной до 2/3 ее толщины. Сварные швы имели во многих местах непровар; кроме того, на внутренней стороне кольцевых накладок валиковые швы были выполнены неправильно, что вызывало большие сварочные напряжения посередине кольца, по которому произошел разрыв. Применение поперечных накладок на продольных стыках также было признано вредным с точки зрения сварочных напряжений в металле. Позднее такие соединения на трубопроводах не применялись.

В процессе работы трубопровод испытывал ощутимую вибрацию, при этом имеющиеся в оболочке старые трещины и расслои могли со временем развиваться.

Фактическая толщина оболочки 19 мм была на 15 % меньше, чем минимальная необходимая толщина по нормам проектирования, действовавшим в период аварии.

Таким образом, причинами аварии трубопровода явились неудачная конструкция сварных соединений оболочки, и высокий уровень расчетных напряжений в сочетании с низким качеством стали и сварных швов. Импульсом к разрушению послужил гидравлический удар в трубопроводе при остановке турбины. В процессе дальнейшей эксплуатации на различных нитках турбинных трубопроводов, главным образом в зоне кольцевых стыков, неоднократно появлялись трещины и течи, которые устраняли местными ремонтными работами.

Через несколько лет все турбинные трубопроводы ГЭС, проработавшие около 40 лет, были заменены новыми.

Построенная на Кавказе в послевоенные годы Краснополянская ГЭС на р. Мзымте имеет открытую и закрытую напорную деривацию в виде свободно лежащего стального трубопровода диаметром 3,2-2,6 м, длиной 1,7 км и

турбинный трубопровод, разветвляющийся на две нитки длиной 205 м и диаметром 2,6-2,5 м. Деривационный трубопровод имеет два ответвления: к уравнильной шахте и к БСР. Станция была введена в промышленную эксплуатацию в 1950 г. [18].

При проектировании расчетный напор в конце деривационного трубопровода был принят равным 60 м, в нижнем конце турбинного трубопровода 139 м. Поскольку гидравлическая схема напорных водоводов ГЭС достаточно сложна, для уточнения реальных значений расчетных давлений в 1967 г. были проведены натурные измерения в нескольких точках трассы при различных режимах работы. Максимальный гидравлический удар наблюдался при сбросе нагрузки 26,4 МВт с двух турбин, питающихся от одной нитки турбинного трубопровода, причем наибольшее давление перед спиральной камерой с учетом удара превысило расчетное значение и достигло 1,61 МПа. В установившемся режиме до сброса нагрузки давление составляло около 1,0 МПа.

В конструкции напорных трубопроводов была использована малоуглеродистая сталь. Конструкция трубопроводов – клепаная, сварные соединения применены на отдельных участках в незначительном количестве.

В марте 1968 г. во время регулирования нагрузки на станции произошел аварийный разрыв верхней части оболочки на участке деривационного трубопровода между анкерными опорами № 14 и 15 примерно на расстоянии 370 м от начала турбинных трубопроводов. В месте разрыва диаметр трубопровода 2,75 м, толщина оболочки 22 мм, напор с учетом гидравлического удара около 70 м. По длине трубы разрыв распространился почти на 6 м, в кольцевом направлении он прошел с одной стороны по клепаному стыку, с другой по целому металлу (рис. 1.3).

В месте разрушения оболочки на поверхности разрыва обнаружили видимые дефекты в стали: старые трещины, расслои, внутренние раковины с неметаллическими включениями. Все обнаруженные старые трещины были расположены с внутренней стороны и имели длину от 50 до 850 мм. Самая

большая трещина распространялась вглубь по толщине оболочки на 15-17 мм. Крупнозернистая структура металла в местах излома свидетельствовала о возможном хрупком разрушении.

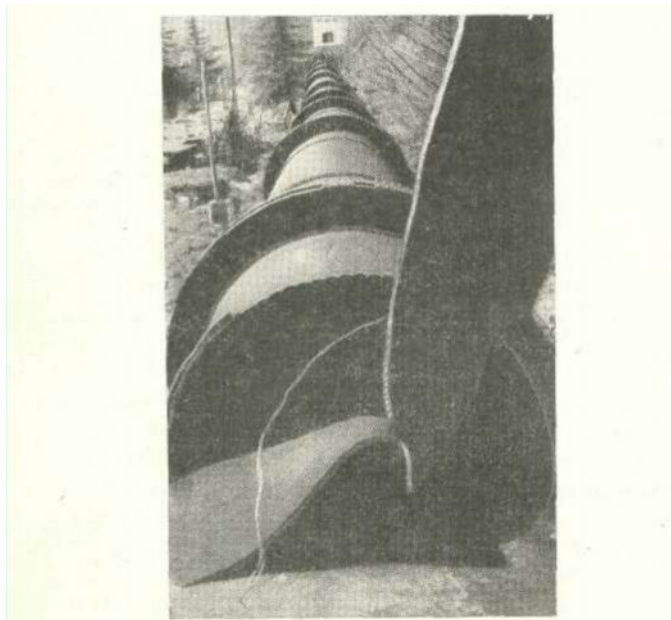


Рис. 1.3. Разрыв оболочки деривационного трубопровода

Осмотр разрыва по заклепчному соединению показал хорошее качество заполнения отверстий и большую пластичность материала заклепок; случаев обрыва головок заклепок и их среза не наблюдалось.

Была оценена степень коррозионных повреждений оболочки трубопровода в зоне аварии. С наружной поверхности оболочки под покрытием из битумного лака следов коррозии обнаружено не было. На внутренней поверхности отмечена язвенная коррозия с глубиной отдельных каверн до 1,5-2,0 мм и площадью от 0,5 до 1 см². Относительное коррозионное повреждение оболочки на участке с толщиной 22 мм не превышало 2,5%.

По химическому составу сталь из аварийного звена соответствовала марке Ст2кп с содержанием углерода на нижнем пределе, что увеличивает склонность металла к старению. Прочностные показатели соответствовали требованиям к указанной марке, однако показатели пластичности (относительное удлинение и сужение при разрыве, ударная вязкость, угол

загиба) оказались ниже нормы.

Исследование структуры металла обнаружило плены, ликвации, большую загрязненность неметаллическими включениями и ферритную строчечность. Разрушение образцов происходило, как правило, через неметаллические включения; металл вблизи включений обезуглерожен. В заключении лаборатории было отмечено низкое качество стали.

В 1968 г. была произведена ультразвуковая дефектоскопия металла оболочки трубопровода на участке от анкерной опоры №14 до здания ГЭС. Ультразвуковую дефектоскопию производили на семнадцати кольцевых полосах шириной по 150 мм каждая, всего контролю подвергалось 23 м² металла. Из общего количества полос только на двух не было обнаружено дефектов, на каждой из остальных пятнадцати полос обнаружили от одного до 18 дефектных мест общей площадью 0,4 м² или 1,7% (по отдельным полосам площадь дефектов достигала 5,5%). Основной вид дефектов – расслои в листе.

Таким образом, стало ясно, что основной производственной причиной аварии было, применение для трубопровода стали низкого качества, не отвечающей требованиям норм проектирования трубопроводов и имеющей склонность к старению. Импульсом к аварии послужил очередной сброс нагрузки с турбины, вызвавший гидравлический удар.

Статическое разрушение оболочки при этих напряжениях могло и не произойти, если не учитывать влияния трещины как концентратора напряжений. Были выполнены оценочные расчеты оболочки на выносливость с использованием характеристик удара, полученных при натурных измерениях. Эти расчеты подтвердили возможность усталостного разрушения оболочки в зоне концентрации напряжений.

По нормам проектирования, действовавшим в период расследования аварии, были выполнены поверочные расчеты прочности трубопровода. Они показали, что на отдельных участках трассы расчетные напряжения существенно превышают допускаемые. Учитывая наличие таких перегруженных участков, низкое качество металла и обнаруженные в нем дефекты, а также

принимая во внимание, что при имеющихся диаметрах одна треть напора ГЭС терялась на преодоление сопротивлений в деривации, был сделан вывод о том, что напорные трубопроводы ГЭС по качеству стали, параметрам и напряженному состоянию не отвечают действующим техническим нормам и подлежат замене с увеличением диаметра. Такая замена впоследствии была осуществлена.

Трубопровод Шамбской ГЭС диаметром 4,6-4,0 м, заделанный в горном массиве, был рассчитан на давление воды 3,9 МПа с учетом упругого отпора породы, коэффициент удельного отпора $K_0=500$ на большей части длины. Материал трубопровода – сталь марки 09Г2С ГОСТ 5521-67 [18].

Основная подводящая нитка турбинного трубопровода направлена под углом примерно 45° к продольной оси здания ГЭС. На расстоянии 78 м от здания ГЭС трубопровод поворачивает в плане, образуя колено. В этом месте к трубопроводу подходит транспортно-инспекционный туннель. По проекту на колене должен был быть устроен лаз диаметром 0,6 м литой конструкции, вваренный в оболочку. Фактически к моменту завершения монтажа и начала эксплуатации лаз выполнен не был, предполагалось его установить позднее, поэтому часть оболочки на колене была оставлена необетонированной. Расчет колена был произведен без учета упругого отпора породы. Толщина оболочки колена 40 мм, тогда как на соседних прямых участках, рассчитанных совместно с породой, толщина составляет 34 мм.

При завершении строительно-монтажных работ по производственным условиям было принято решение не производить предпусковые гидравлические испытания трубопровода, что допускается строительными нормами для заделанных в скале напорных трубопроводов. Рассматриваемый трубопровод в целом также относился к данному типу, исключение составлял лишь относительно небольшой необетонированный участок оболочки на колене. Авторы проекта трубопровода в соответствии со СНиП III-18-75 обусловили отказ от гидравлических испытаний тщательным контролем сварных швов, в частности, дефектоскопией всех стыковых швов на оболочке и контролем

заделки цементационных отверстий.

Сразу после начала эксплуатации трубопровода с ним произошла авария. Возник разрыв в верхней части оболочки на необетонированном участке колена, площадь образовавшегося отверстия составила около $8,6 \text{ м}^2$. Вода из разорванного трубопровода хлынула в транспортный туннель и, выйдя из него, затопила здание станции.

Тщательный осмотр места разрыва оболочки, произведенный специалистами-технологами, позволил установить, что разрыв инициирован непроваром на участке продольного шва оболочки колена длиной около 150 мм. Начавшийся отсюда разрыв распространился далее с выходом на целый металл, захватив примерно 3 м длины оболочки. В окружном направлении разрыв также на значительном участке прошел в зоне термического влияния поперечных швов, на расстоянии до 100 мм от их оси.

В зоне разрыва на колене были обнаружены также заваренные продольные монтажные разрезы оболочки, использовавшиеся для подгонки звеньев в поперечных монтажных стыках. В этих местах также имелись несплошности сварных соединений, требовавшие ремонта. Таким образом, производственной причиной аварии явилось низкое качество монтажных работ на заключительной стадии монтажа трубопровода. Допущенный дефект сварного шва в достаточно напряженной зоне оболочки толщиной 40 мм (по расчету напряжения равняются допускаемым и составляют 192 МПа) не был обнаружен неразрушающими методами контроля.

Наиболее надежной проверкой, которая позволила бы выявить производственный брак и избежать аварийных последствий, следует считать гидравлические испытания, отказ от которых, тем более при наличии незаделанного участка, представляется недостаточно обоснованным.

Ремонт оболочки колена производился путем заварки места разрыва вставкой из четырех кусков листового металла толщиной 40 мм из стали марки 09Г2С-12 ГОСТ 19282-73. Одновременно производили ремонт швов продольных монтажных разрезов, где были обнаружены несплошности. Сварка

производилась по специально разработанной технологии, устанавливающей порядок наложения и обработки швов, марки и диаметр электродов, контроль. Для замыкающих швов вставки для ремонта монтажных разрезов и для заварки пробок цементационных отверстий были предусмотрены аустенитные электроды марки ЭА-395/9 диаметром 4 мм.

На Нурекской ГЭС в процессе сооружения девяти ниток высоконапорных турбинных стальных трубопроводов диаметром 6,0 м, заделанных в горной породе, дважды имели место повреждения стальной оболочки под действием наружного давления [18].

В первом случае на вертикальном участке трубопровода №7 при проведении укрепительной цементации горной породы произошло выпучивание части оболочки площадью примерно 10 м². В радиальном направлении стрелка выпучины достигла 0,5 м. На этом участке оболочка толщиной от 22 до 30 мм из стали 10Г2С1 ГОСТ 5058-65 была снаружи подкреплена кольцами жесткости в виде полос сечением 20х200 мм. После того, как поврежденный участок металлоконструкции был вырезан и удален, обнаружили, что оболочка, деформируясь под давлением цементационного раствора, увлекала за собой кольца жесткости, которые вышли из бетона на 0,35 м, после чего разрушились швы, соединяющие оболочку с кольцами.

Трубопровод был рассчитан на наружное давление цементации 0,8 МПа примерно с двойным запасом. Характер повреждений и выполненные расчетные оценки свидетельствуют о том, что фактическое цементационное давление достигало значения порядка 2 МПа. Производственной причиной повреждения трубопровода при производстве цементационных работ явилось отсутствие строгого контроля, как за уровнем давления, так и за состоянием трубопровода.

Второй случай выдавливания оболочки имел место на горизонтальном участке трубопровода №6 во время гидравлических испытаний соседнего трубопровода № 5. На оболочке образовалась выпучина длиной 3,8 м и шириной до 2,1 м, стрелка выпучины 0,4 м. Через восемь месяцев стрелка

уменьшилась до 0,15 м. Предполагается, что причиной выпучивания оболочки явилось проникновение воды под давлением из испытуемого трубопровода №5 через неплотно заваренные цементационные отверстия оболочки и имеющийся в районе выпучивания некачественно забетонированный коммуникационный ход в затрубное пространство водовода №6.

На строительстве Загорской ГАЭС также имело место аналогичное повреждение стальной оболочки под действием наружного давления [18]. Напорные трубопроводы сталежелезобетонной конструкции с внутренним диаметром 7 м имели внутреннюю стальную оболочку толщиной 10 мм из стали 09Г2С и двухрядный армокаркас из стали класса А-III диаметром 32-40 мм, причем внутренний ряд спиральной арматуры навит непосредственно на оболочку. Трубопроводы собирали на трассе из звеньев длиной по 4 м. В процессе омоноличивания стыков между звеньями трубопровода №1 во время цементации из-за недостаточного контроля за давлением произошло отслоение от бетона стальной оболочки в торцах нескольких звеньев, проникновение цементного раствора под давлением в зазор между оболочкой и бетоном и выдавливание оболочки внутрь трубопровода. В результате образовались шесть местных выпучин (вздутий) протяженностью до 8 м вдоль трубы и до 2,5 м в поперечном направлении. Наибольшая стрелка выпучины достигала 0,4 м. Все выпучины располагались в нижней части трубопровода, т. е. в зоне действия наибольшего давления. Для ремонта трубопровода потребовалось выполнение трудоемких работ по удалению и замене сильно деформированных участков оболочки.

Для повышения устойчивости крайних участков оболочки с целью предотвращения в дальнейшем отслоения ее от бетона было решено крайние витки арматуры, навитой на оболочку, размещать непосредственно у торцов с приваркой к оболочке двусторонними прерывистыми швами с шагом 1 м.

На одной из насосных станций Куйбышевского обводнительно-оросительного канала в период гидравлических испытаний был поврежден целиком, стальной напорный трубопровод диаметром 2,3 м из

малоуглеродистой стали с толщиной стенки 12 мм без колец жесткости [18]. Трубопровод был проложен в траншее со сплошным опиранием по дну на уплотненную грунтовую подушку. После гидравлических испытаний он подлежал засыпке. Расчетное давление составляло 0,55 МПа, испытательное давление около 0,8 МПа. Трубопровод благополучно выдержал испытания, после чего была открыта сливная труба, и началось опорожнение трубопровода. Через несколько часов обнаружили, что произошло сплющивание оболочки трубопровода по всей его длине – около 350 м, верхняя часть трубы оказалась вогнутой и имела форму лотка (рис. 1.4).

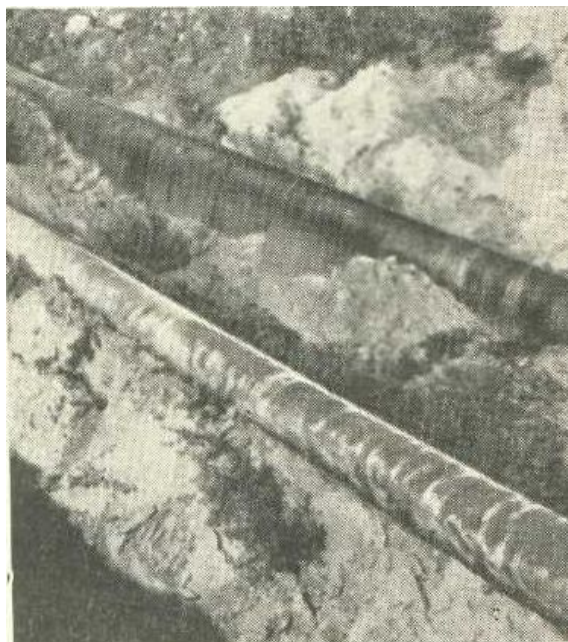


Рис. 1.4. Сплющивание оболочки трубопровода в результате потери устойчивости

Причиной аварии был грубый просчет персонала, выразившийся в нарушении технических правил, запрещающих производить опорожнение трубопровода, не убедившись предварительно в исправности открытых аэрационных устройств. В трубопроводе возник глубокий вакуум и под действием атмосферного давления он потерял устойчивость.

Для ликвидации последствий аварии было принято решение выправить оболочку обратным надувом водой. Уже при давлении около 0,6 МПа

трубопровод в целом был выправлен, однако в отдельных сечениях оболочка сохранила местные неровности, связанные с тем, что металл уже приобрел остаточные деформации.

Другой, весьма поучительный случай повреждения засыпанного трубопровода сходных параметров произошел также в период строительства на одном из энергетических объектов Северного Кавказа [18]. Прокладка двух ниток трубопровода осуществлялась в траншее, участок трассы проходил в глубокой выемке, это способствовало скоплению в траншее значительного количества воды от таяния снега и дождей. Под действием взвешивающей силы произошло всплытие трубопроводов на участке затопления с изгибом их в вертикальной плоскости и пластическим деформированием (сплющиванием) поперечных сечений (рис. 1.5). Причиной здесь также было нарушение правил производства строительных работ, предписывающих принимать меры для отвода воды из траншеи на период монтажа трубопровода.

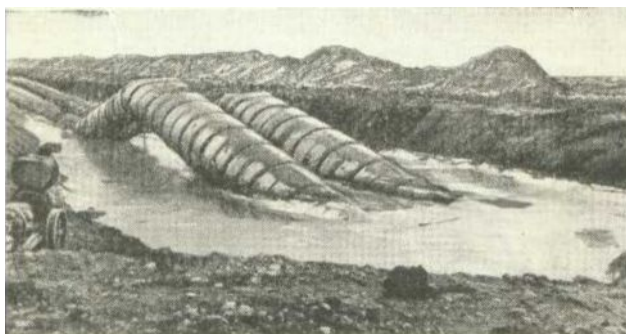


Рис. 1.5. Повреждение трубопровода в период монтажа в результате всплытия

На одной из насосных станций Волго-Донского судоходного канала им. В.И. Ленина имеются три нитки стальных трубопроводов длиной по 0,8 км и диаметром 2,8 м [18]. Трубопроводы сварной конструкции разрезного типа с сальниковыми компенсаторами в каждом пролете выполнены из стали Ст.3 по ГОСТ 380-41, расстояние между промежуточными катковыми опорами – 15 м.

На всем протяжении, кроме крайнего участка у здания насосной, толщина

оболочки составляет всего 8 мм, расчетная толщина 6 мм. Как показали натурные измерения, фактический расчетный напор с учетом гидравлического удара составляет для нижнего участка у здания насосной 27,3 м, для остального трубопровода всего 14,8 м. Особенность работы такого низконапорного трубопровода заключается в том, что основной нагрузкой для него является не внутреннее давление воды, а собственный вес трубопровода и вес заключенной в нем воды; прочность определяется в основном продольными напряжениями в стенке трубы, которая изгибается между опорами как неразрезная балка, а также напряжениями от изгиба опорных колец. В данном случае положение усугублялось тем, что трубопровод был проложен на слабом суглинистом грунте, склонном к набуханию при замачивании и с явно выраженными виброкомпрессионными свойствами.

При завершении строительства трубопровода в 1952 г. сразу после его наполнения произошло оползание по склону первой от здания насосной анкерной опоры и разрушение трубопровода. После восстановления трубопровод был испытан, тогда же была составлена инструкция по наблюдению за осадками и регулированию высотного положения его опор, которой были ограничены допустимые просадки промежуточных опор по отношению к двум соседним. Дальнейшая эксплуатация трубопровода была осложнена длительно нарастающими во времени неравномерными осадками опор, в большей степени промежуточных. В зимнее время наблюдалось зависание опорожненного трубопровода над опорами. Абсолютные значения осадок опор увеличивались по направлению к водоприемнику, где за 20 лет они превысили 0,35 м. Неравномерность осадок отдельных опор составляла 25-35 мм, что значительно выше предельно допустимого значения; при этом в некоторых поперечных швах появлялись трещины. Для выправления оси трубопровода использовали трудоемкую операцию «взвешивания» опорожненного трубопровода на гидродомкратах, установленных на всех опорах, при этом добивались равномерного нагружения домкратов путем изменения количества регулировочных прокладок. На отдельных опорах толщина пакета прокладок

достигла 160 мм.

В процессе эксплуатации трубопровод подвергался интенсивной коррозии изнутри со средней скоростью 0,07-0,08 мм в год в условиях отсутствия защиты внутренней поверхности. Этому способствовало длительное нахождение в трубопроводе стоячей воды в теплое время года. В результате средняя толщина оболочки по данным ультразвуковых измерений в 1979 г. составила 5,9 мм (при расчетной толщине 6 мм), а на отдельных участках толщина упала даже ниже 5 мм. Расчеты показали, что в результате коррозионного ослабления и просядок опор оболочка в нижней зоне опорных колец сильно перегружена.

Было принято решение о реконструкции трубопровода, а для временного его усиления использовали установку на каждом фундаменте под опорным кольцом дополнительной резинометаллической упругой опоры, обеспечивающей отпор около 30 кН. Эта мера изменила расчетную схему работы опорного кольца, разгрузила его перенапряженную зону и позволила продолжать безопасную эксплуатацию трубопровода в течение нескольких лет до полной реконструкций.

На Киевской ГАЭС при испытании одной из шести ниток стационарных трубопроводов диаметром 3,8 м и длиной около 300 м произошло разрушение конической заглушки, которое привело затем к разрыву самого трубопровода [18].

По производственным условиям до начала гидравлических испытаний трубопровода в конической заглушке, установленной на его нижнем конце, были вырезаны временные отверстия для пропуска воды под напором около 70м. Затем эти отверстия были тщательно заделаны стальными вставками, приваренными встык.

Ниже заглушки в спиральной камере во время гидравлических испытаний оставался определенный объем воздуха. Нижний манометр был установлен на заглушке. В процессе опрессовки трубопровода контроль за давлением по этому манометру не производился по соображениям безопасности. Когда

давление в трубопроводе примерно достигло максимального значения, произошло разрушение низовой заглушки. Последующий осмотр ее показал, что это разрушение носило хрупкий характер, и было инициировано вставками, вваренными во временные отверстия. За разрушением заглушки последовал разрыв трубопровода в районе промежуточной опоры №4, который сопровождался заметным развитием местных деформаций в металлоконструкции.

Механизм аварии можно представить себе таким образом. При разрушении заглушки вода под давлением хлынула в спиральную камеру и сжала находившийся там воздух. Расчет показывает, что при испытаниях упругий объем одной нитки трубопровода составлял примерно 7 м^3 . Сжатый воздушный мешок сыграл роль упругого тела, способного создать волну повышения давления, распространяющуюся вверх по трубопроводу. При вытекании воды из трубопровода в нем неизбежно должен был образоваться глубокий вакуум. Затем последовал прорыв воздуха под давлением в трубопровод, при этом возник резкий гидравлический удар, давление которого превысило прочность трубопровода. Не исключено, что имел место даже разрыв сплошности столба воды в отдельных сечениях трубопровода. В сечении, где затем происходит соударение разорванных частей столба воды, возникает положительный гидравлический удар, причем его уровень может быть очень высоким. В данном случае разрыв опорного кольца трубопровода свидетельствует о весьма значительном повышении давления. Участники испытаний успели заметить в момент, предшествующий аварии, распространение волны деформации (вздутия оболочки) вверх по трубопроводу.

Развитие аварии и разрыв трубопровода произошли из-за того, что ниже заглушки в помещении станции не были обеспечены условия, исключающие прорыв и попадание в трубопровод сжатого воздуха при разрушении низовой заглушки.

Приведенные примеры аварий и повреждений стальных трубопроводов различных типов свидетельствуют о том, что среди причин отказов

металлоконструкций преобладают производственно-технологические: использование дефектных материалов, неудачная технология при изготовлении и монтаже, низкое качество сварных соединений, недостаточно строгий контроль производственных процессов, нарушение строительных норм и правил. Практически отсутствуют аварии, вызванные проектными причинами. Это свидетельствует о том, что статическая работа трубопроводов различных типов достаточно хорошо изучена, а уровень проектирования довольно высок [18].

На стадии эксплуатации разрушения происходят либо в самом начале, когда выявляются грубые производственные дефекты, либо после длительной работы, когда под влиянием многократно повторных нагрузений, вибрационных, абразивных и коррозионных воздействий развиваются имеющиеся в основном металле, и швах внутренние микродефекты (расслои, трещины), изменяется напряженное состояние, а также возникает ослабление сечений. Поэтому существенное значение имеет антикоррозионная защита металла, контроль вибрационного состояния трубопровода при различных режимах, а также наблюдение за положением его опор в плане и по высоте.

Любая авария трубопровода ГЭС (ГАЭС), как правило, влечет за собой недоотпуск электроэнергии. Повреждение трубопровода во время строительства или при испытаниях нередко приводит к задержке пуска агрегатов, если авария не повлекла за собой более тяжелых последствий, таких, например, как затопление станции.

Большая часть аварий и повреждений трубопроводов связана с действием субъективных факторов, среди них имеются грубые просчеты и прямые нарушения, исключив которые можно резко сократить количество аварийных случаев, повысить надежность эксплуатации и избежать материальных затрат, связанных с исправлением повреждений и ликвидацией последствий аварий.

Известны случаи отказов и повреждений механического оборудования, как правило, происходящих в начальный, строительный период [19]. Только за 1984-1989 годы зафиксировано 17 отказов ГЭС, вызванных нерабо-

тоспособностью механического оборудования. В ряде случаев отказы носили аварийный характер.

При переключении строительных расходов на Саяно-Шушенской ГЭС с водосбросов I-го яруса на II-й, а затем на эксплуатационный водосброс неоднократно складывалась ситуация, когда с ростом напора на затворы смонтированное по проекту механическое оборудование I-го яруса уже не могло работать под напором ВБ (отметка 104 м), а механическое оборудование II-го яруса еще не было готово. В результате этого и ряда других причин в 1979 г. был затоплен котлован здания ГЭС и выведен из работы первый гидроагрегат, введенный в эксплуатацию в декабре 1978 г. на пониженном напоре (при отметке ВБ 83 м).

Из 275 электростанций, обследованных в 1977-1980 г.г. на 59 электростанциях состояние механического оборудования было признано неудовлетворительным, причем на многих из них были отмечены существенные отступления от правил его эксплуатации. Основными причинами неудовлетворительного состояния механического оборудования являются разрушение и предельный износ отдельных частей и элементов оборудования (42%) и коррозионные повреждения (28%) [20].

Водосливная плотина Воткинской ГЭС была оборудована семью плоскими односекционными скользящими затворами; в одном пролете был установлен сдвоенный скользящий затвор типа «глаголь» [21]. Последний предназначался для сброса сора от здания ГЭС при его тралении по поверхности воды в сторону водосливной плотины. Однако попытки сбросить плавающую древесину таким способом не имели успеха, так как при опускании верхней секции затвора на полный ход (3,225 м) не создавались скорости воды, достаточные для увлечения древесины в пролет, образовывалась пробка между бычками плотины. Кроме того, для эффективного траления плавающего сора вдоль здания ГЭС требовалась глубокая разгрузка агрегатов (до 70-100 МВт), иначе усилий двух кранов было недостаточно. Для сброса сора приходилось полностью открывать затвор соседнего пролета плотины, сбрасывая вхолостую

расход в 1400 м³/с. Зимой 1969 г. при температуре воздуха – минус 40°С произошло разрушение нижней секции затвора типа «глаголь». Причиной разрушения явилось замерзание замкнутого объема воды, образовавшегося между верхней и нижней секцией, и создание концентрации напряжений в зоне стыкового шва, оказавшегося в отдельных местах ослабленным.

В 1970 г. при осмотрах основных рабочих затворов в местах примыкания поясов ригелей к опорно-концевым стойкам с низовой стороны были обнаружены сквозные трещины по вертикальным поясам стоек. Причиной появления трещин явилась концентрация напряжений в переходных местах от пояса стойки к поясу ригеля. По рекомендации проектной организации в этих местах были вварены переходные косынки. Общим недостатком конструкции основных затворов является отсутствие отбойных решеток для предохранения верхнего ригеля от забрасывания плавающей древесной.

По данным обследования в 1957 г. Перервинского гидроузла канала имени Москвы примерно за 20 лет эксплуатации сегментные затворы из-за коррозии потеряли прочность до 30...50%, а некоторые их элементы имели сквозные повреждения. Очень сильно пострадали от коррозии металлоконструкции Камской ГЭС. На обшивках, стойках, поясах ригелей и диафрагм затворов за 3...4 года эксплуатации появилось громадное количество очагов коррозии с углублением на 1,5...3,5 мм [22].

Сегментный затвор водосливной плотины Перервинского гидроузла на канале имени Москвы защищали от коррозии путем битумной окраски. Выполненное в 1957-1958 гг. конструкторской организацией обследование с измерением напряжений в некоторых элементах верхней секции показало, что многие элементы металлоконструкции имеют значительные ослабления в результате коррозионных повреждений: на верхней секции до 15...20%, на нижней — до 30 %, а на отдельных элементах — до 50 %. В некоторых местах даже проржавела насквозь стальная обшивка ног нижней секции. Отдельные расколы погнуты ударами плавающих тел, прогибы составляли 15...30 мм [4].

Поверочные расчеты металлоконструкций с учетом фактических сечений элементов, отличных от проектных, и повышения уровня воды показали, что в верхней секции сжатые элементы ног имеют гибкость значительно выше нормативной (168 и 190 при допустимой 120); подкосы усиления ног, выполненные во всех пролетах, кроме четвертого, по проекту из одиночного уголка 65x65x8, также имеют недопустимую гибкость 198, и их устойчивость по расчету совершенно не обеспечивается. Напряженное состояние и гибкость остальных элементов отвечают нормам. В нижней секции ряд элементов нижнего ригеля имеют перенапряжение до 27%. Аналогичные элементы с перенапряжениями до 13 % были обнаружены и на одиночных сегментных затворах плотины.

По результатам обследования было отмечено, что вследствие значительных коррозионных повреждений общее состояние затворов трудно считать удовлетворительным и в течение ближайших лет, очевидно, придется заменять затворы, поэтому следует подготовить проект новых затворов. Было предложено усилить элементы с недопустимыми гибкостями и с перенапряжениями более 10%, а также заменить элементы, ослабленные коррозией свыше 15%. Как исключение разрешалось на срок не более 3 лет оставить сжатые элементы с перенапряжением 13 % при обязательном наблюдении за их состоянием.

В начале весеннего паводка 1964 г. с одним из сегментных затворов этого гидроузла произошла авария. При подъеме верхней секции под напором в результате несинхронного включения механизмов возник некоторый перекосяк секции, при этом опорные ноги испытывали наряду со сжатием и изгибом также скручивание. Одна нога потеряла устойчивость, вследствие чего, давлением воды, она была разрушена на расстоянии около 1 м от опорного шарнира. Аналогичные повреждения произошли и на второй ноге. Под напором воды секция сдвинулась приблизительно на 2 м по горизонтальному оголовку нижней секции, перекосилась и в таком положении остановилась, упираясь одной ногой в грань бычка.

Технической причиной повреждений явились чрезмерная гибкость отдельных элементов конструкции, а также значительный коррозионный износ. Следует обратить внимание на то, что усиление элементов, подверженных коррозии, уголком с приваркой двумя швами по перу создает замкнутую полость, недоступную для очистки и окраски, а потому малоэффективно.

Импульсом к возникновению повреждения послужил неравномерный подъем верхней секции под напором.

Вскоре после описанного случая был разработан проект новых сегментных затворов, у которых нижняя секция чечевицеобразного сечения имеет с низовой стороны водосливную обшивку, очерченную как водослив практического профиля. В конце 60-х годов старые затворы, прослужившие более 30 лет, были демонтированы и заменены новыми [4].

Несомненно, что своевременная замена ослабленных коррозией элементов конструкции позволила бы избежать аварийной ситуации и продлить срок эксплуатации затворов. Характерно, что на этом же гидроузле на верхней голове судоходного шлюза эксплуатировался построенный в то же время сегментный затвор пролетом 30 м аналогичной конструкции, также изготовленный из стали марки Ст3, причем он работал в более тяжелых коррозионных условиях и к 60-м годам претерпел свыше 50 000 циклов повторных нагружений. В этот период было проведено подробное обследование сегментного затвора с проверкой металла и состояния заклепочных соединений.

По результатам обследования 42 изношенных коррозией элемента затвора были выбракованы и заменены, выполнена антикоррозионная защита металла, после чего эксплуатация продолжалась нормально до конца 70-х годов, когда затвор заменили новым. Таким образом, он проработал в условиях интенсивных шлюзований более 40 лет [4].

На Усть-Каменогорской ГЭС на р. Иртыш было смонтировано около 5,6 тыс. тонн различных металлоконструкций и около 20 тыс. м² металлических облицовок и поверхностей, подверженных в той или иной мере коррозионному

износу. На значительной части металлоконструкций (около 55%), облицовок и поверхностей (около 70%) регулярно проводились мероприятия по их защите от коррозии. На остальной части конструкций эти работы не проводились в силу того, что необходимость в них была недостаточно ясна (например, металлические облицовки напорных водоводов, рабочие колеса турбин и др.), либо в том случае, когда обычные методы защиты были неосуществимы, так как конструкции не могли быть извлечены из воды для покраски (различные закладные части).

Уже в начальный период эксплуатации гидроузла (в 1952 г.) серьезное беспокойство персонала станции вызывало состояние затворов напорных водоводов: за 3...4 года их эксплуатации по существу без защитных покрытий (однослойная покраска железным суриком, выполненная при строительстве станции, в расчет не принималась) глубина коррозионных язв на поверхности металла достигла 3...4 мм. При подобной интенсивности коррозии срок службы некоторых металлоконструкций составлял бы недопустимо малый срок, не превышающий 20...30 лет [23].

Начиная с 1956 г. силами эксплуатационного персонала станции были начаты работы по защите металлоконструкций от коррозии, однако невысокий технический уровень этих работ (покраска кузбаслаком и при ручной очистке скребками) не позволял осуществить надежную защиту конструкций: спустя 1...2 года после покраски покрытия разрушались, и коррозия возобновлялась.

Наиболее значительные коррозионные повреждения металлоконструкций наблюдались в бассейнах Волги. Осмотр затворов Волжской ГЭС им. В. И. Ленина показал [24, 25], что после 2-5 лет эксплуатации на ряде конструкций имелись язвы глубиной 5...7 мм.

На металлических конструкциях гидросилового и гидромеханического оборудования сооружений Пермского гидроузла количество язв глубиной до 5...7 мм составляло около 50 штук на 1 дм², причем наиболее интенсивно коррозионный процесс протекал в зоне полного погружения металла (затворы

турбинных камер, нижняя часть затворов водосливной плотины, сороудерживающие решетки и другие конструкции) [26].

Особенно опасны коррозионные разрушения стенок металлических напорных трубопроводов, которые могут быть причиной серьезных аварий на ГЭС; помимо того, коррозия приводит к увеличению шероховатости и, как следствие, к потере напора.

На Днепрогэс им. В. И. Ленина при обследовании внутренней поверхности напорного трубопровода, облицованного металлом, были обнаружены многочисленные язвенные повреждения глубиной от 0,5 до 2,8 мм и минеральные отложения, которые еще больше способствовали увеличению гидравлического сопротивления в трубопроводах. При определении степени шероховатости внутренней поверхности оказалось, что высота отдельных выступов достигала 6,0 мм. Такая шероховатость привела к потерям напора примерно на 3,5% и потерям выработки электроэнергии порядка 2,5 млн. *квт•ч/год* [27].

Примерами коррозионного растрескивания могут служить разрушение «Серебряного моста» через реку Огайо (США) 15 декабря 1967 г. после 40 лет эксплуатации, повлекшее гибель 46 человек [28].

Состояние плотины Волховской ГЭС до 1978 года было надежным. Плотина оставалась хорошо сохранившимся и вполне исправным сооружением. Подводная и надводная части здания ГЭС в своей строительной части находились в хорошем состоянии. Между зданием ГЭС и шлюзом располагался водоспуск с двумя отверстиями пролетом по 9 м каждое, перекрытый стальными затворами, управляемыми электролебедками. Хотя строительная часть водоспуска находилась в хорошем состоянии, и реконструкции не требовалось, вездесущая коррозия снизила надежность и долговечность этой ГЭС. Надежность снижало то, что требовалась замена затворов, имеющих значительный коррозионный износ [29].

Часто эксплуатационный персонал ограничивается лишь декоративной окраской металлоконструкций или вообще не окрашивает их на протяжении

десятков лет. Например, на каскаде Нижне-Бозсуйских ГЭС некоторые затворы, расположенные в труднодоступных местах, длительное время не окрашивались, что привело к снижению их несущей способности. Это говорит о том, что персонал некоторых электростанций относится к механическому оборудованию как к второстепенному, не участвующему в выработке электроэнергии, и состояние которого не влияет на экономические показатели энергопредприятия. Не всегда обслуживающий персонал имеет квалификацию, достаточную для того, чтобы правильно организовать эксплуатацию и ремонт металлических конструкций и механического оборудования, что нередко приводит к их отказу.

В процессе эксплуатации механического оборудования колесных затворов Горьковской и некоторых других ГЭС имели место затруднения, вызванные заклиниванием подшипников колес затворов по причине ржавления осей и недостаточных посадочных зазоров. Была выполнена реконструкция подшипников путем увеличения посадочных зазоров и наплавки на оси нержавеющей стали. Было предложено отказаться от применения ржавеющих сталей для подшипников колес затворов, сделав соответствующие изменения в отраслевом стандарте [17].

На Сенгелевской гидроэлектростанции каскада Кубанских ГЭС в конце напорного деривационного трубопровода был установлен дифференциальный резервуар башенного типа, от которого начинаются три нитки турбинных трубопроводов диаметром 2,6 м. Наружный бак диаметром 12,5 м и высотой около 25 м был поднят на высоту 12 м над осью деривационного трубопровода. Внутренний вертикальный стояк диаметром 4,6 м отходил от трубопровода и через коническое днище проходил внутрь наружного бака. Общая высота стояка была более 30 м, толщиной стенки 8 мм. Выше днища наружного бака в стенке стояка были прорезаны 8 окон размером 600х600 мм для сообщения с объемом бака и опорожнения его в случае опорожнения трубопровода.

В 1980 г. с уравнительным резервуаром произошла авария из-за обрушения верхней части внутреннего стояка. Его осмотр показал, что

обрушение было вызвано серьезными коррозионными повреждениями стояка, ослабление сечения стенки местами превышало 40%. При ремонте резервуара была произведена его реконструкция, он был превращен в резервуар с местным сопротивлением. Производственной причиной повреждения резервуара следует признать недостаток эксплуатации — отсутствие эффективной защиты конструкций от коррозии [18].

На одной из насосных станций Волго-Донского судоходного канала им. В. И. Ленина имеются три нитки стальных трубопроводов длиной по 0,8 км и диаметром 2,8 м. Трубопроводы сварной конструкции разрезного типа с сальниковыми компенсаторами в каждом пролете выполнены из стали Ст.3 ГОСТ 380-41, расстояние между промежуточными катковыми опорами — 15 м. На всем протяжении, кроме крайнего участка у здания насосной, толщина оболочки составляет всего 8 мм, расчетная толщина 6 мм.

В процессе эксплуатации трубопровод подвергался интенсивной коррозии изнутри со средней скоростью 0,07...0,08 мм в год в условиях отсутствия защиты внутренней поверхности. Этому способствовало длительное нахождение в трубопроводе стоячей воды в теплое время года. В результате средняя толщина оболочки по данным ультразвуковых измерений в 1979 г. составила 5,9 мм (при расчетной толщине 6 мм), а на отдельных участках толщина упала даже ниже 5 мм. Расчеты показали, что в результате коррозионного ослабления и просадок опор оболочка в нижней зоне опорных колец сильно перегружена [18].

В июне 1937 г. был введен в эксплуатацию канал им. Москвы, имеющий исключительно важное значение не только как связующее звено единой глубоководной судоходной системы (Москва — порт пяти морей), но и являющийся сегодня единственным и надежным источником водообеспечения города [30].

Канал, по современным меркам, является сложнейшим гидротехническим комплексом, включающим плотины, гидроэлектростанции, насосные станции, судоходные шлюзы и другие гидротехнические сооружения. Даже современные

большегрузные и пассажирские суда проходят по каналу расстояние в 128 км, беспрепятственно преодолевая десяти - пятнадцатиметровые «ступени» с помощью одиннадцати судоходных шлюзов.

Работа шлюзов на канале отличается высокой интенсивностью и достигает сорока шлюзований в сутки. Естественно, что механическое оборудование шлюзов, которое, как известно, является их основным технологическим оборудованием, от быстродействия которого зависит пропускная способность всего канала, за эти годы изрядно поизносилось.

В этих условиях актуальным стал вопрос определения степени износа механического оборудования (особенно затворов, двустворчатых ворот и их механизмов) и определения гарантированного срока (продолжительности) их бесперебойной работы после очередного ремонта. Естественно, срок безотказной их работы после ремонта должен быть не менее продолжительности навигационного периода, но определить и гарантировать этот срок становилось все трудней и все с меньшей степенью достоверности.

Проводимые ежегодные обследования состояния шлюзовых ворот и затворов показывали, что в некоторых труднодоступных для нанесения лакокрасочных покрытий местах коррозионное разрушение металла достигало 4...6 мм. Наличие одного этого фактора уже вносит существенную неясность при определении достоверной несущей способности затворов и ворот, но наибольшую озабоченность вызывают обнаруженные явления «усталости» металла (усталостные микротрещины). Появление таких микротрещин является следствием вибрации затворов и шлюзовых ворот (или их отдельных частей), вызываемой гидродинамическими нагрузками при статической «работе» затворов (например, при наличии протечек через щели и повреждения в уплотнениях) и при их движении в потоке, при наличии остаточного перепада, сильного ветра, коррозии, несимметричного приложения знакопеременного тягового усилия, случайных ударов шлюзующихся судов и т. п. Обнаружить такие трещины на ранних стадиях появления трудно (особенно под наслоениями краски). Однако это как раз и вызывает наибольшее опасение, так

как после некоторого «инкубационного» периода раскрытие «усталостных» трещин в местах наибольших напряжений вызываемых статической (расчетной) нагрузкой может происходить лавинообразно, что естественно может привести к разрушению несущих элементов пролетного строения затворов или ворот.

Тщательно изучив материалы проводившихся обследований состояния шлюзовых ворот, комиссия пришла к единодушному заключению, что одновременно с реконструкцией шлюзов необходимо произвести замену всех двустворчатых ворот [30].

Одной из самых значительных аварий из-за коррозии, было коррозионное разрушение трубопроводов отопительной сети г. Варшавы общей длиной в несколько десятков километров [31]. Процесс коррозии был ускорен действием теплоизоляции труб, выполненной из асфальтового порошка. Замена труб, поврежденных коррозией, стоимость которых была очень высока, привела также к длительным перерывам в эксплуатации сети.

Характерен тот факт, что большинство аварий, причиной которых явилось коррозионное разрушение несущих элементов, произошло внезапно без каких-либо предварительно замеченных деформаций конструкций, несмотря на то, что сечения элементов уменьшались постепенно. Это явление можно объяснить неравномерностью уменьшения сечений при их коррозии и наличием выемок в сечении. В зависимости от формы элементов и узлов, несущее сечение конструктивных элементов на некоторых участках разрушается значительно быстрее, и это не проявляется заметными деформациями конструкций. В момент возникновения в этом сечении критического состояния, происходит внезапное разрушение элемента как при хрупком разрушении.

Об этом свидетельствует авария водосборника [31]. Большое влияние на скорость протекания процесса коррозии оказывает форма сечений конструктивных элементов. Цилиндрический резервуар для воды емкостью 3000 м³ был сооружен без проектной документации и расчетов на прочность.

Резервуар имел диаметр 18,98 м и высоту 11,80 м. Вследствие сильной местной коррозии, напряжения в нижней части оболочки резервуара значительно возросли и превысили предел текучести стали. Произошло внезапное разрушение оболочки по всей ее высоте. Под влиянием напора стремительно вытекающей из резервуара воды произошел отрыв оболочки от дна и крыши, при этом часть листа размером 11,80 х 6 м была отброшена примерно на расстояние 50 м. Катастрофа развивалась столь стремительно, что крыша упала на дно резервуара практически без боковых перемещений. Сильный поток воды из резервуара произвел значительные разрушения на близлежащих участках.

Вышеприведенный анализ аварий и разрушений металлических конструкций показывает, что эта проблема полностью не решена и всегда будет стоять перед всеми работниками гидротехнических сооружений, и перед теми, кто занимается вопросами надежности металлических конструкций. Это требует проведения новых исследований с помощью современных инновационных технологий.

1.3 Анализ исследований напряженно-деформированного состояния металлических конструкций гидротехнических сооружений

Опыт эксплуатации механического оборудования канала имени Москвы и некоторых других транспортных гидротехнических сооружений показывает, что надежная работа инженерных конструкций в значительной степени определяется прочностью шлюзовых ворот (рис. 1.6), основными элементами которых являются: несущая пространственная ферма, состоящая из клепаных и сварных элементов – ригелей, диафрагм, диагональных связей, поясных уголков и стрингеров; элементов опирания – опорных и упорных подушек веревальных и створных столбов; элементов удерживания – гальсбантов и пятовых устройств; напорной водонепроницаемой металлической обшивки. После нескольких лет работы таких ворот были обнаружены трещины в околошовных зонах, у крепежных отверстий в устройствах удержания, в поясных уголках нижнего ригеля и обшивке [32].

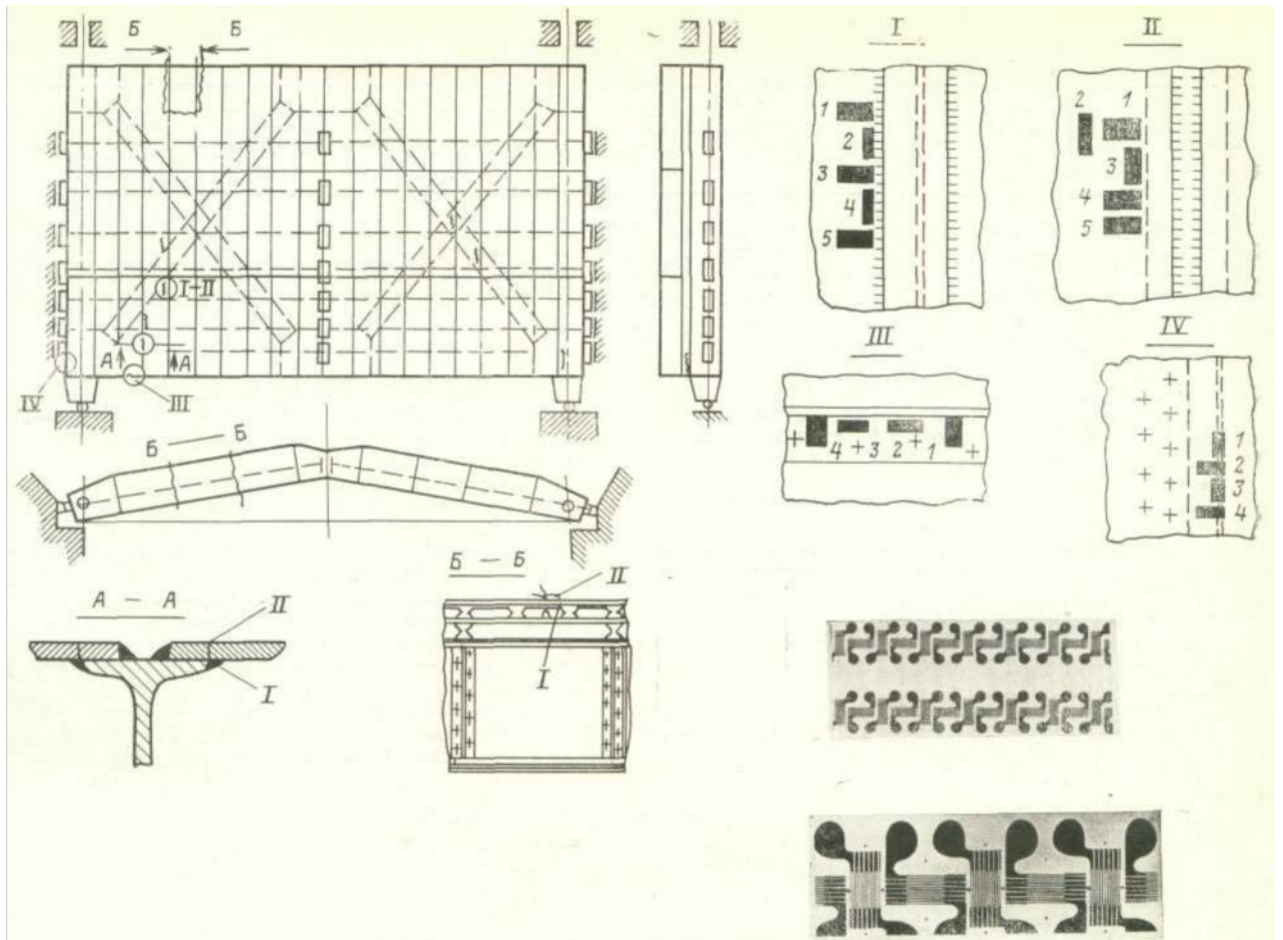


Рис. 1.6. Зоны обнаруженных разрушений шлюзовых ворот.

Схемы наклейки тензорезисторов ТФРЦУ-0

Условия работы элементов конструкции ворот характеризуются цикличностью приложения нагрузок (рис. 1.7, 1.8). Нагружения за 1, 10 и 25 лет эксплуатации могут составить соответственно 4000, 40 000 и 100 000 циклов нагружения, что дает основание предполагать об усталостном происхождении обнаруженных разрушений в малоцикловой области.

Малоцикловая усталость ограничивается разрушающим числом циклов – по моменту образования макротрещин или окончательному разрушению, равным до $5 \cdot 10^4 - 10^5$ циклам. Как правило, малоцикловое разрушение связано с наличием пластической деформации материала в зонах концентрации напряжений. В связи с этим при оценке прочности существенным является исследование напряженно-деформированного

состояния наиболее напряженных элементов конструкции и изменения его с числом циклов нагружения.

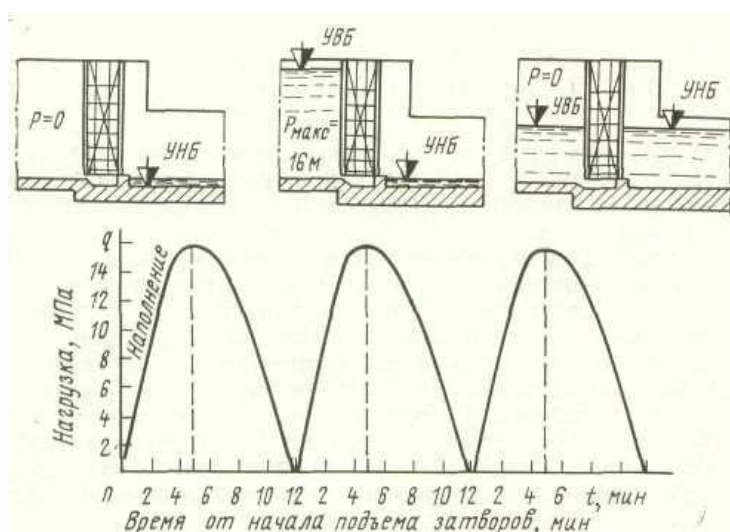


Рис. 1.7. Основные этапы работы шлюза

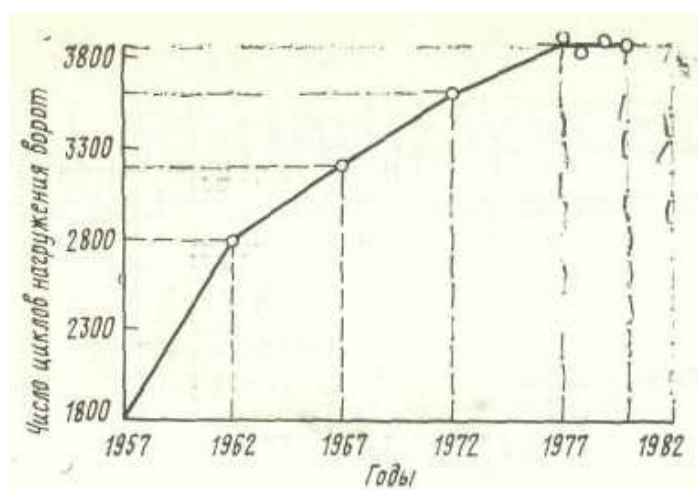


Рис. 1.8. Число циклов нагружения ворот по годам

Распределение деформаций и напряжений в зонах концентрации можно получить на основе теоретического решения или экспериментальным путем. В силу сложности конструкции шлюзовых ворот расчетное определение напряжений в названных выше элементах конструкции может быть определено лишь приближенно. В то же время для оценки работоспособности ворот необходимо располагать данными о местных деформациях материала в максимально напряженных зонах и, в частности, в зонах концентраций,

вызванных изменением формы, наличием отверстий, сварных швов и т.д.

С целью получения таких данных были выполнены замеры в натуральных условиях как малых упругих, так и значительных упругопластических деформаций.

Использован тензорезисторный метод измерения деформации, сочетающий в себе высокую постоянную чувствительность ($1 \cdot 10^{-5}$ единиц относительной деформации), широкий диапазон измерения ($1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-1}$), а также возможность дистанционной регистрации измеряемого параметра и простоту обработки данных. В качестве первичных датчиков использовались специальные малобазные фольговые тензорезисторы (рисунок 6), надежно работающие при статическом и повторно-статическом нагружениях. Вторичной тензометрической аппаратурой служил автоматический измеритель деформации АИД-4м и коммутатор ПД-100М.

Зоны тензометрирования выбирались на основе данных межнавигационных осмотров, выявивших разрушения некоторых элементов несущей конструкции ворот, а также из соображений необходимости исследования работы материала в местах повышенной концентрации напряжений.

Всего было установлено 20 тензорезисторов на следующие (рис. 1.6) наиболее нагруженные элементы:

- а) напорную водонепроницаемую обшивку в зоне приварки к двутавровым балкам на уровне третьего и четвертого ригелей (зоны I и II);
- б) поясной уголок нижнего ригеля веревального столба (зона III);
- в) торцевой лист напорной части веревального столба в зоне первого и второго ригелей (зона IV).

Малая база (1 мм), а также плотное расположение тензорезисторов, выполненных в виде цепочек прямоугольных розеток с шагом 2 мм, позволили с высокой точностью провести измерения деформаций в локальных зонах исследуемых элементов.

Поскольку большинство тензорезисторов, установленных на объекте,

должны были работать под водой в зоне движения льда (исследование проводилось в период начала навигации), защита датчиков от механических повреждений осуществлялась металлическими приклеиваемыми колпачками. Гидроизоляция тензорезисторов выполнялась заливкой внутреннего пространства колпачка герметиком на основе эпоксидной смолы с пластификатором (железный сурик). Эти меры обеспечили работоспособность датчиков под водой в течение месяца.

Тензометрирование проводилось в следующей последовательности: сначала фиксировались показания тензорезисторов при полностью опорожненной верхней камере шлюза, т. е. при нулевой нагрузке на ворота. Затем в процессе заполнения водой верхней камеры шлюза производились замеры на 3-х уровнях нагружения, включая момент максимального наполнения. Следующий замер снова осуществлялся в момент полного опорожнения камер шлюза. Разность показаний тензорезисторов в момент максимальной и нулевой нагруженности шлюзовых ворот позволяет определить значения величины циклической деформации материала в локальной зоне – в месте установки тензорезисторных датчиков.

Измеренные тензорезисторами максимальные циклические деформации 0,235-0,4% существенно превышают деформацию предела пропорциональности материалов, что свидетельствует о выходе материала в максимально напряженных зонах конструкции за пределы упругости и подтверждает возможность малоциклового усталостного характера разрушения элементов шлюзовых ворот.

Из работы [32] были сделаны следующие выводы:

- на основании анализа условий работы элементов шлюзовых ворот канала имени Москвы, а также натурного тензометрирования был обоснован малоциклового характер нагружения и возможность разрушений в максимально напряженных зонах вследствие появления в конструкционном материале повторных упругопластических деформаций;
- необходимо проведение расчетного и экспериментального определения

малоцикловой долговечности элементов несущих конструкций шлюзовых ворот и выработка рекомендаций по увеличению их сопротивления циклическому разрушению.

Анализ обследования двустворчатых ворот ряда шлюзов показал, что на металлоконструкциях створок после нескольких лет эксплуатации могут появиться трещины. Определить их возникновение по результатам натуральных обследований трудно, вероятно, действует циклический характер нагрузки, несовершенство конструкции, изготовление и возможность малоцикловых разрушений [33].

Шлюзовые ворота – сложная пространственная сварная конструкция часто с неясными условиями опирания по вертикальным створному и веревальным столбам, нагрузками, действующими как в плоскостях створок, так и перпендикулярно к ним.

Сложность в определении нагрузок, кроме гидростатической, наличие нерегулярностей в опорных условиях, трудоемкость применения в данной ситуации метода конечных элементов для прочностного расчета делают расчетную задачу о напряженно-деформированном состоянии металлических конструкции нерядовой.

Поэтому возникла необходимость изучения работы двустворчатых ворот на тензометрической модели. Модель позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние НДС комплексно или отдельно от гидростатического давления, неравномерности опирания в столбах.

Неравномерность опирания в столбах связана с наличием зазоров между опорными подушками; с появлением клиновидного зазора в створном столбе (прямой клин - вершина у верхнего ригеля, обратный - у нижнего ригеля); с раздвижением стенок камеры шлюза при ее наполнении водой и от сезонных изменений температуры. В частности верх стенки шлюза Саратовского гидроузла при высоте 24,75 м перемещается без учета распора от ворот на 11 мм. Значит в районе торца стенок камеры при наличии распора, т. е. примерно удвоения нагрузки на стенку, можно ожидать, что основание «обратного»

клина составит около 40 мм.

За прототип модели приняты пятнадцатиригельные створки ворот нижней головы Чебоксарского шлюза, модель изготовлена из листового оргстекла. Модель выполнена действующей, с высокой степенью подобия не только по толщинам и габаритным размерам, но и по конструкции гальсбанта, шаровой пяты, опорных подушек, приводного механизма.

Створки помещены в металлический резервуар с водонепроницаемыми стенками и дном, имитирующими нижнюю голову шлюза. На рис. 1.9. показано нагружение модели гидростатическим давлением.



Рис. 1.9. Общий вид модели

НДС модели оценивается показаниями наклеиваемых тензодатчиков с базой 3 мм. Количество тензодатчиков (240 штук), места их размещения определялись необходимостью сопоставления и анализа расчетных и экспериментальных результатов в наиболее нагруженных зонах напорной и безнапорных сторон. При этом учитывались также результаты статистической оценки характерных мест трещинообразования на действующих воротах. Большинство трещин появлялось на поясах нижних ригелей 1-4 в районах стыковки с веревальным, створным столбами, на сварных стыках самих столбов. Для повышения достоверности информации тензодатчики размещены симметрично

на обеих створках. Регистрация деформаций производилась при постоянном УНБ и ступенчатом подъеме УВБ.

Полученные результаты были рекомендованы для учета в расчетных схемах секций при проектировании двустворчатых ворот, а также при их монтаже [33].

Выводы и постановка задачи

1. Сделанный анализ показывает, что для обеспечения безопасности металлических конструкций гидротехнических сооружений необходим контроль надежности и долговечности этих сооружений.
2. Контроль надежности и долговечности осуществляется с помощью современных методов измерения деформаций и напряжений в элементах металлических конструкций гидротехнических сооружений, которые будут рассмотрены в следующих главах.
3. На элементы металлических конструкций гидротехнических сооружений в основном воздействуют совместно механические напряжения (статические и динамические) и коррозия.
4. Причины коррозии металлических конструкций в водной среде пока не получили достаточно полного освещения. До сих пор еще не выработана общепринятая теория зарождения и развития коррозии под напряжением в водной среде. Также не полностью учтены и рассмотрены силы, влияющие на процесс коррозии. Ни в одном из рассмотренных нами источников не установлено место в процессе коррозии магнитных свойств ферромагнитных изделий, к которым относятся основные корродирующие элементы металлических конструкций гидротехнических сооружений. Поэтому исследования в этом направлении представляют большой теоретический и практический интерес.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСИЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

2.1 Экспериментальные исследования тензорезисторного способа измерения напряжений

Экспериментальные неразрушающие методы измерения напряжений основаны на измерении деформации элементов конструкции различными тензомерами, в частности, механико-оптическими и другими устройствами, измеряющими деформационные смещения непосредственно с испытуемого объекта [34]. Однако это возможно при испытании конструкции пробными нагрузками, т.е. для определения приращения напряжения без учета величин уже имеющихся напряжений, сформировавшихся до наклейки или установки других тензометров. При этом способе измерения деформации в загружаемых элементах изделий, измерение деформации осуществляется за счет разности показания индикаторных приборов до и после загрузки. Этот факт исключает его применения в предварительно загруженных элементах изделий, что является недостатком данного способа.

Во многих случаях невозможно фиксировать приращение деформаций, так как элемент может находиться в предельном состоянии, и загрузка пробной нагрузкой может довести элемент конструкции до разрушения. В связи с этим появляется нужда измерения имеющихся напряжений в загруженных элементах изделий, чтобы в дальнейшем проводить неразрушающий контроль материалов, правильно и безопасно эксплуатировать элементы изделий.

Предлагаемый тензорезисторный способ измерения напряжений [35, 36] отличается тем, что вначале снимают показание индикаторного прибора загруженного элемента изделия, затем снимают показание индикаторного прибора, точно такого незагруженного эталонного элемента изделия и по разности показаний определяют величину напряжений в загруженном элементе

изделия.

Тензорезисторный способ измерения напряжений в элементах изделий производится следующим образом. На нагруженный элемент изделий заклеивается один из типов тензорезисторов и измеряется напряжение с помощью индикаторного прибора. После этого на точно такой, только незагруженный эталонный элемент изделий заклеивается одинаковый тензорезистор и берётся показание индикаторного прибора. По разности показания индикаторных приборов определяют величину напряжений в нагруженных элементах изделий.

Для исследования тензорезисторного способа измерения напряжений был проведен эксперимент, для чего нами была выбрана стальная балка равного сопротивления (рис. 2.1).

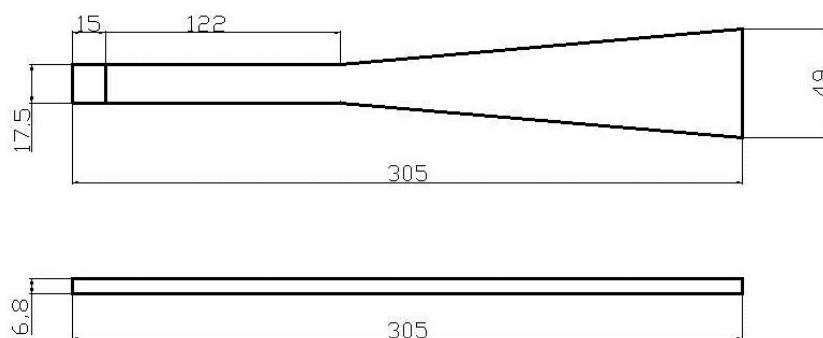


Рис. 2.1. Стальная балка равного сопротивления

Испытания образца производилась с помощью экспериментальной механической установки, на которой осуществлялись изгиб балки нагружением грузами (рис. 2.2). Установка состоит из: станины, жесткозащемляющей опоры, консольной балки равного сопротивления предназначенной для испытания. Производились статические испытания. Для испытательных нагрузок были приняты весовые гири (рис. 2.2).

В нашем эксперименте использовался проволочный тензорезистор общего назначения с многоэлементной петлевой решеткой на бумажной основе – ППКП-20-203. Параметры датчиков: база – 20 мм; $R = 201,7 \pm 0,3$ Ом; $S =$

2,04; $V = 1,11$; $G_i = 0,13$; $TKC = 2,79$.



Рис. 2.2. Экспериментальная механическая установка

Регистрация данных в ходе испытаний и обработка полученной информации осуществлялись с помощью программно-аппаратного комплекса «ЭРА-ПРИС», созданного специалистами РГП КазНИИССА (г. Алматы) на базе системы «ПРИС-1000», разработанной и сертифицированной НТЦ «Техническая диагностика и прецизионные измерения» (г. Москва, сертификат RU.E.34.010.A № 17408/1). Общий вид программно-аппаратного комплекса «ЭРА-ПРИС» в процессе работы показан на рис. 2.3.

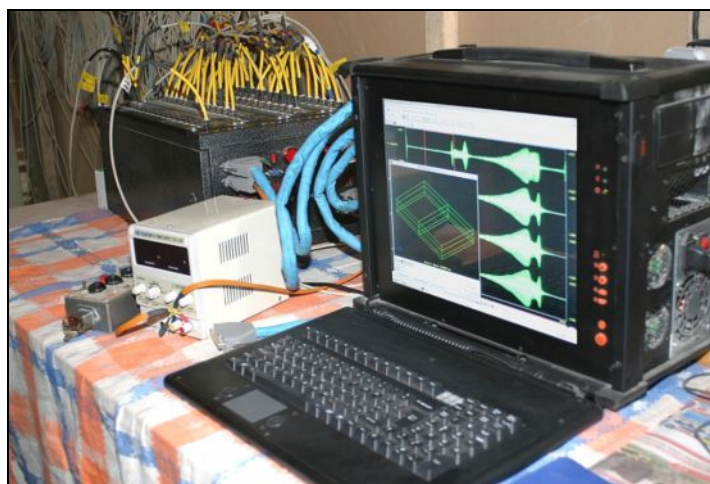


Рис. 2.3. Программно-аппаратный комплекс «ЭРА-ПРИС»

В аппаратную часть комплекса входят: блок ввода аналоговых сигналов, включая прецизионные источники питания, в том числе – для тензометрических датчиков; системный блок аналого-цифрового преобразования на основе дельта-сигма АЦП и мобильного вычислительного устройства со встроенным жидкокристаллическим монитором 15,4 дюйма и клавиатурой. Основные технические данные и характеристики системы показаны в таблице 2.1.

Во многих случаях тензорезисторные приборы могут регистрировать относительные деформации, соответствующие 20 мПа. Используемый нами измерительный прибор позволяет регистрировать деформации, соответствующие 2 мПа, что позволяет фиксировать незначительные относительные деформации, которые были недоступны при измерении другими измерительными приборами.

Таблица 2.1 - Технические данные и характеристики системы

Параметры	Величина
Количество измерительных каналов	64
Динамический диапазон измерительного тракта, дБ	90
Частота дискретизации на канал, кГц	до 48
Точность измерений виброускорений, % от диапазона	±0.5
Точность измерений относительных удлинений, % от диапазона	±0.1
Удаленность устанавливаемых датчиков измерения от мобильного компьютера, м	до 100
Рабочий диапазон температур, град. С	5...30

Система также позволяет регистрировать сигналы от датчиков различных типов одними и теми же каналами АЦП. В частности, она может работать с прецизионными акселерометрами, мостовыми или полумостовыми схемами из тензодатчиков сопротивлением 50 Ом и более, а также с терморезисторами, пьезодатчиками, потенциометрическими, индуктивными, емкостными и

другими типами датчиков без использования вторичных преобразователей при измерении постоянных и изменяющихся во времени сигналов. Так как, регистрирующая аппаратура может уловить малые величины напряжений в этой конструкции при их измерении, для исключения дрейфов от разных явлений: прогрева каналов замера, шумов, температурных перепадов, изменения напряжений в электропередаче, подключения кондиционера, открывание окон и дверей, ходьбы при измерении, воздухообмена, радиоволн, было принято решение измерять напряжения в балке двумя каналами: опорной и рабочей (подключение двух тензорезисторов).

Для регистрации омического сопротивления тензорезистора при его питании переменным или постоянным током применяли схему моста Уитстона при измерении деформации изгиба. Для этого тензорезисторы размещаем на наиболее удаленных от оси волокон материала и включаем в смежные плечи тензомоста так, чтобы приращения их складывались, а растяжения и сжатия взаимно уничтожались [36].

Особенность эксперимента заключалась, в том что, экспериментальную балку равного сопротивления размерами $305 \times 49 \times 17,5 \times t=6,8$ мм изначально загрузили 7 кг весовыми гирями (по теоретическим расчетам, примерно $\sigma=570 \dots 590$ кг/см²), и после загрузки наклеили тензорезистор (1) на эту балку. Клей тензорезистора (1) осушили по стандартам наклейки (12 часов), и после этого сняли все весовые гири. В данном эксперименте тензорезистор (1) был в сжатом состоянии, так как балка была разгружена. Затем наклеили рабочий тензорезистор (2), и осушили его по стандартам наклейки. Спустя 12 часов после наклейки к сжатому (1), рабочему (2) и компенсационным (3) тензорезисторам подключалась регистрирующая аппаратура с помощью монтажных проволок, и начиналось измерение (рис. 2.4). В эксперименте загружали балку, навешивая на неё по 1 кг весовых гирей.

Шаг загрузки балки наблюдали по стабилизации напряжения на графике, строящегося на экране измерительной аппаратуры. Убедившись, что напряжение на графике в какой-то мере стабилизировалось, таким способом

навешивали следующую весовую гирю. После навески 7 кг весовых гирей около 5 минут наблюдали за стабилизацией показаний напряжения на графике. После начали разгружать балку, снимая с неё по 1 кг весовых гирь. Шаг разгрузки балки наблюдали по стабилизации напряжения на графике, строящегося на экране измерительной аппаратуры.

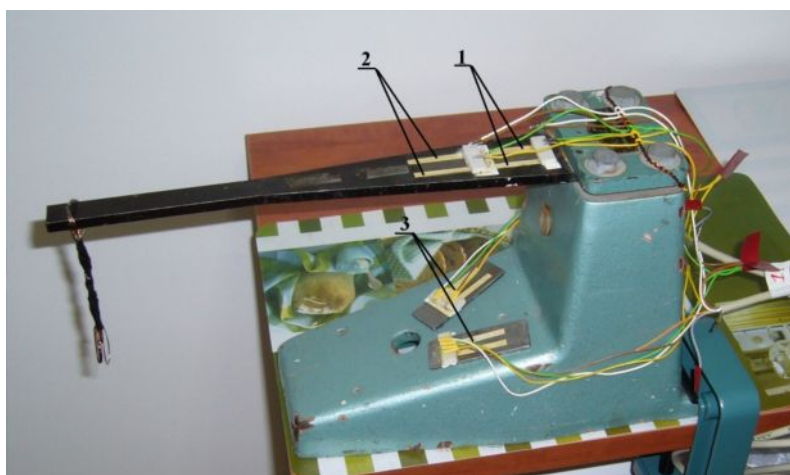


Рис. 2.4. Подключение тензорезисторов

Графики записи сжатого тензорезистора (1) показаны на рис. 2.5, а рабочего (2) на рис. 2.6. По графикам видно, что оба тензорезистора при загрузке балки показывают растяжение, сжатый стремится к нулю, а рабочий к минусовым отметкам ($\sigma_{\max} \approx -570 \text{ кг/см}^2$). При разгрузке балки оба тензорезистора показывают сжатие, сжатый стремится к высоким отметкам ($\sigma_{\max} \approx 570 \text{ кг/см}^2$), а рабочий к нулю.

Измерения, произведенные рабочим тензорезистором (2) являются стандартными измерениями, т.е. незагруженную балку загрузили, измерили появившееся напряжение от весовых гирь и получили соответствующие графики. Но здесь не были учтены напряжения балки, которые она имела до загрузки весовых гирь.

Уже имеющиеся напряжения в балке определяются следующим образом. Предположим, что мы не знаем, насколько загружена балка (на которую мы повесили весовые гири общей массой 7 кг), и она является загруженным

элементом изделия, где требуется определить величину напряжений. Так как тензорезистор (1) был наклеен на предварительно загруженную балку, после разгрузки балки на экране измерительной аппаратуры он показывал сжатие. Это величина напряжения от сжатия соответствует уже имеющемуся напряжению в данной балке. На рис. 2.5 видно, что до первого нагружения 1 кг весовых гирь показания тензорезистора (1) находились на отметке $\sigma \approx 570 \text{ кг/см}^2$, с каждым новым нагружением напряжение стремилось к нулю, а после полного нагружения (7 кг) тензорезистор (1) показывал, что в балке напряжение равняется нулю. После разгрузки показания тензорезистора (1) опять приблизилось к отметке $\sigma \approx 570 \text{ кг/см}^2$. В данном случае отметка $\sigma \approx 570 \text{ кг/см}^2$ является уже имеющимся напряжением в экспериментальной балке.

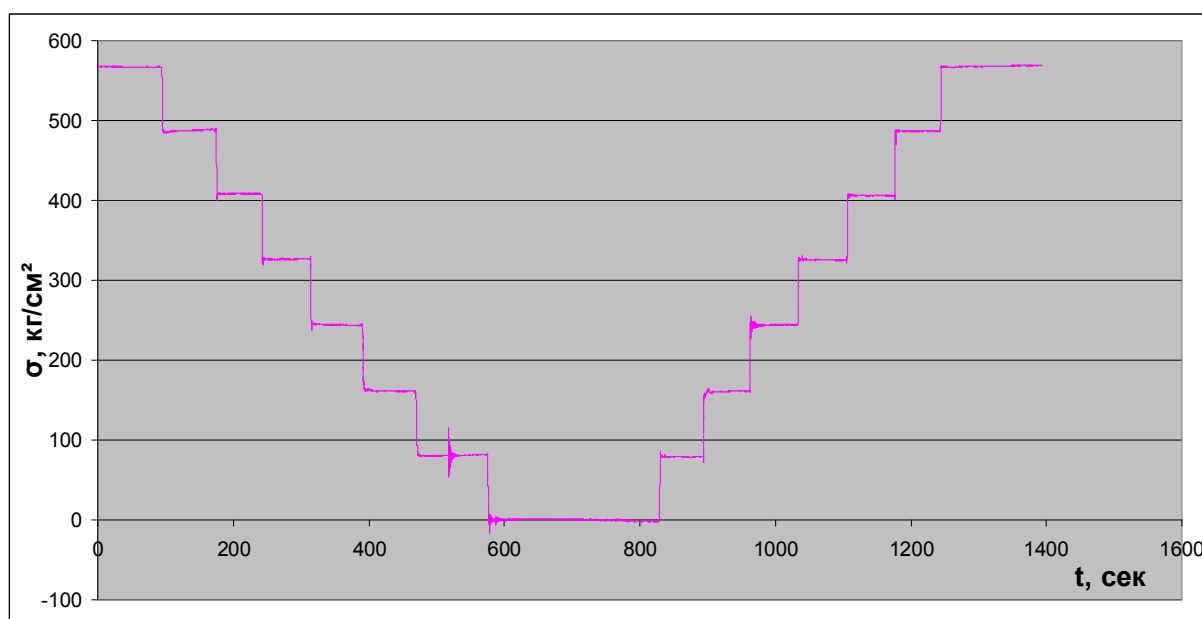


Рис. 2.5. График изменения напряжений, записанный сжатым тензорезистором (1)

Для осуществления на практике предложенного тензорезисторного способа измерения напряжений в элементах изделий имеются несколько проблем. К ним относятся: отыскание эталонного образца, недостаточная база измерения тензорезисторов, которая не позволяет обхватить всю измеряемую длину элемента изделий [36].

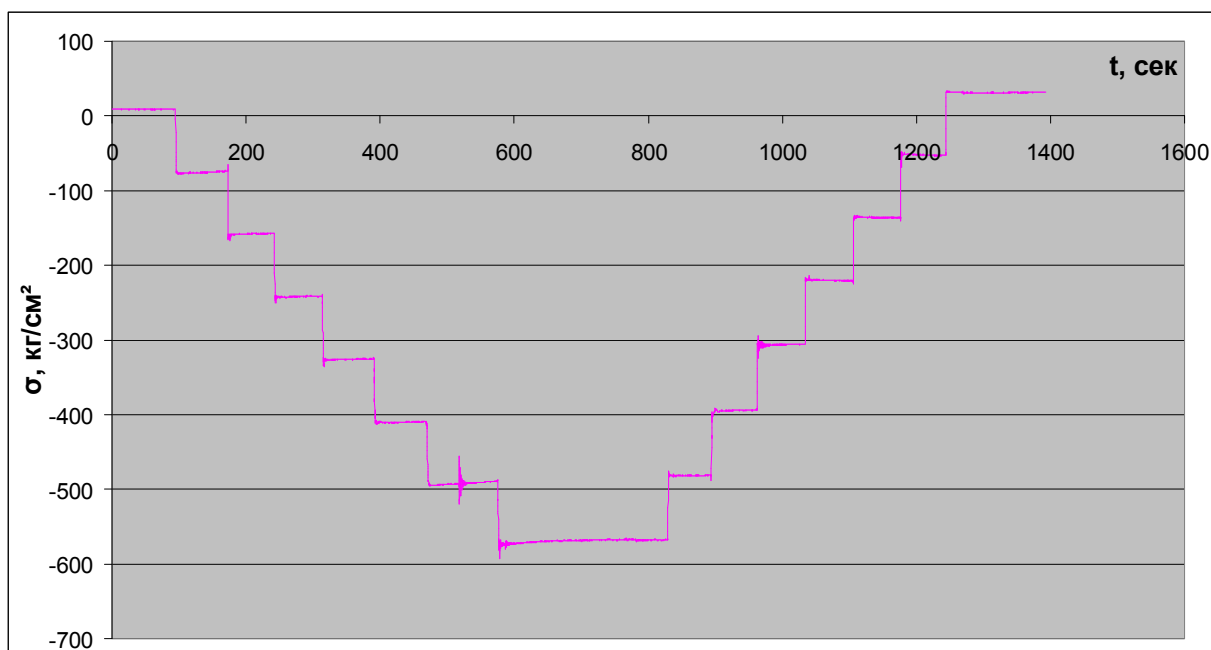


Рис. 2.6. График изменения напряжений, записанный рабочим тензорезистором (2)

2.2 Экспериментальные исследования атопологического способа измерения напряжений

Из известных методов и средств тензометрии перечисленным требованиям в наибольшей степени отвечает метод резистивной тензометрии, использующий в качестве первичных средств тензопреобразователи активного сопротивления или тензорезисторы [37].

В настоящее время известно множество способов и методов использования тензорезисторов для измерения напряжений в конструкциях и материалах. Одним из них является атопологический способ измерения напряжений [36, 38]. Этот способ отличается от других тем, что позволяет расширить область применения тензорезисторов для измерения деформаций и напряжений в нагруженных элементах изделий.

Атопологический способ измерения напряжений в нагруженных элементах изделий, например, нагруженной металлической балки производится следующим образом. Во-первых, снимают показания индикаторных приборов еще не заклеенного тонкого листа из

электронепроводящих материалов с наклеенной заранее тензорезисторами.

После этого на поверхность испытуемой загруженной металлической балки заклеивают этот тонкий лист из электронепроводящих материалов с заранее наклеенными тензорезисторами. В результате атопологического воздействия в тензорезисторах изменяются омические сопротивления, которые фиксируются индикаторным прибором.

По разности показания индикаторных приборов определяют величину напряжения в загруженной металлической балке до, и после наклейки тонкого листа. Затем с помощью закона Гука определяют напряжение в загруженной металлической балке.

Для исследования атопологического способа измерения напряжений в загруженных элементах изделий был проведен эксперимент, для чего нами была выбрана стальная балка равного сопротивления (рис. 2.1).

Испытания образца производилась с помощью экспериментальной механической установкой, на которой осуществлялись изгиб балки загрузением грузами (рис. 2.2). Производились статические испытания. Для испытательных нагрузок были приняты весовые гири (рис. 2.2).

В эксперименте использовался проволочный тензорезистор общего назначения с многоэлементной петлевой решеткой на бумажной основе – ППКП-20-203. Регистрация данных в ходе испытаний и обработка полученной информации осуществлялись с помощью программно-аппаратного комплекса «ЭРА-ПРИС». Так как, регистрирующая аппаратура могла уловить малые величины напряжений в этой конструкции при их измерении, для исключения дрейфов от разных явлений, было принято решение измерять напряжения в балке двумя каналами: опорной и рабочей (подключение двух тензорезисторов). Для регистрации омического сопротивления тензорезистора при его питании переменным или постоянным током применяли схему моста Уитстона при измерении деформации изгиба.

Особенность эксперимента заключалось, в том что, тензорезистор (1) клеился на обычную машинописную бумагу равного размера, и осушался по

стандартам наклейки (12 часов). Далее тензорезистор подключался к регистрирующей аппаратуре с помощью монтажных проволок, и начиналось измерение. Измерительный процесс длился 25 минут. График изменения напряжений этого измерения показан на рис. 2.7 [36].

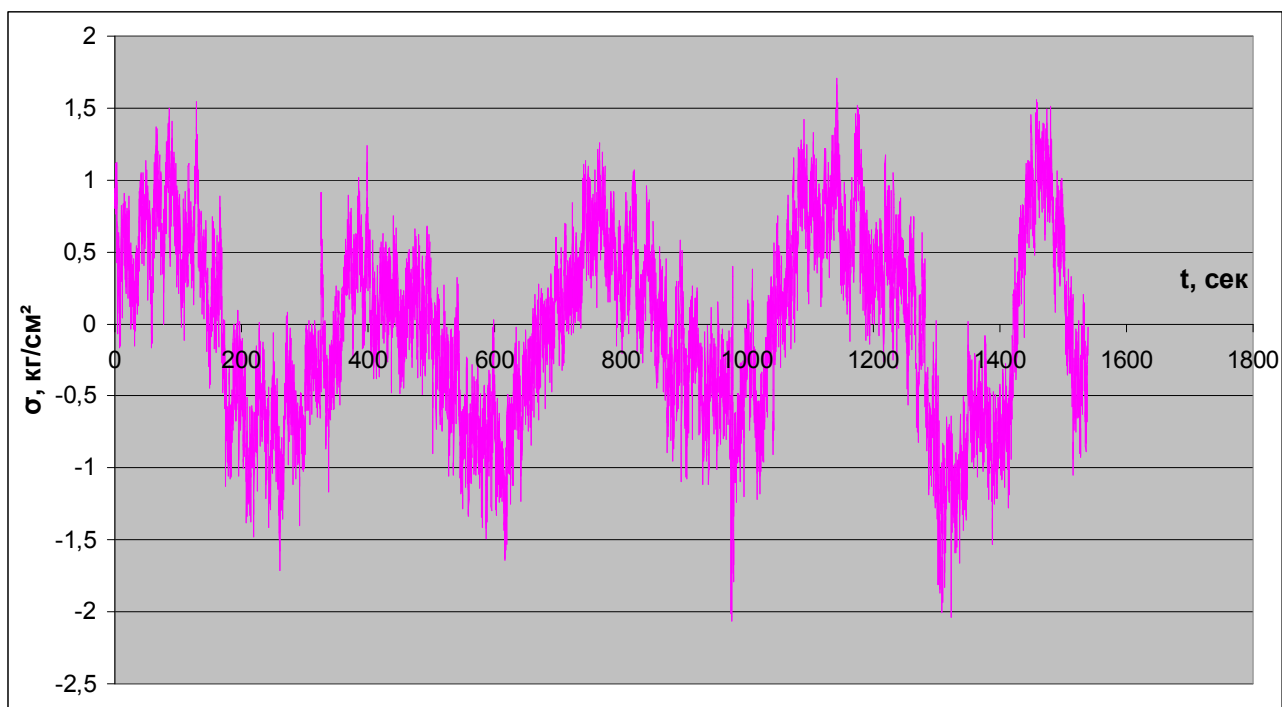


Рис. 2.7. График изменения напряжений, записанный тензорезистором (1)

Далее на экспериментальную балку равного сопротивления размерами 305x49x17,5x $t=6,8$ мм клеилась машинописная бумага, на которой был наклеен тензорезистор (1) от предыдущего измерения (назовем его условно тензорезистор (2)). Клей тензорезистора осушался по всем стандартам наклейки. Спустя 12 часов после наклейки к тензорезистору подключалась регистрирующая аппаратура, и начиналось измерение. В эксперименте загружали балку, навешивая на неё по 1 кг весовых гирей (общий вес 7 кг - по теоретическим расчетам, примерно $\sigma=570\dots590$ кг/см²), разгрузка балки осуществлялось тоже по 1 кг весовых гирей.

Измерительный процесс длился также как и первом измерений 25 минут. По плану эксперимента начали загружать балку, навешивая на неё по 1 кг весовых гирь. Шаг загрузки балки наблюдали по стабилизации напряжения на

графике, строящегося на экране измерительной аппаратуры. Убедившись что, напряжение на графике в какой-то мере стабилизировалось, навешивали таким способом следующую весовую гирию. После навески 7 кг весовых гирей около 5 минут наблюдали за стабилизацией показаний напряжения на графике. После начали разгружать балку, снимая с неё по 1 кг весовых гирь. График изменения напряжений, записанный тензорезистором (2) показан на рис. 2.8.

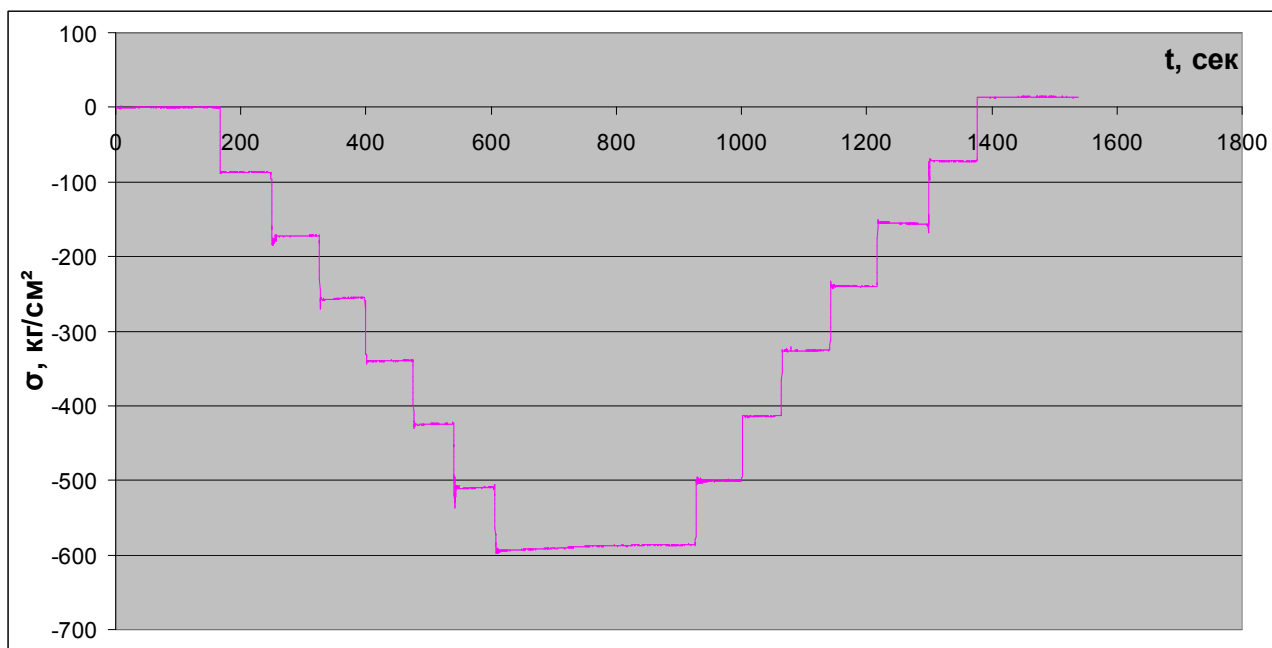


Рис. 2.8. График изменения напряжений, записанный тензорезистором (2)

По графику, который показан на рис. 2.7 видно, что показания тензорезистора (1) наклеенного на обычную машинописную бумагу изменяются по определенной амплитуде и варьируют в пределах $\sigma \approx \pm 2$ кг/см². Это изменение связано с улавливанием дрейфов на измерительном канале.

Что касается второго измерения, здесь показания тензорезистора (2) при загрузке балки показывает растяжение (рис. 2.8), и падает к минусовым отметкам ($\sigma_{\max} \approx -600$ кг/см²), а при разгрузки тензорезистор (2) показывает сжатие, и стремится к нулю. Эти результаты показали, что тензорезистор, наклеенный на бумагу из-за атопологического воздействия воспринимает изменения напряжений (растяжение, сжатие) в экспериментальной балке. Хотя,

для получения более ясных картин мы использовали загрузку весовыми гирями.

Таким способом можно измерять напряжения в нагруженных элементах изделий, когда невозможно найти незагруженный эталонный образец изделия. Он может быть использован при измерении механических напряжений в элементах изделий применяемых в машиностроительной, строительной и других отраслях промышленности [36].

2.3 Экспериментальные исследования электромагнитным методом при измерении напряжений в металлических конструкциях

2.3.1 Теоретические предпосылки электромагнитного метода

В настоящее время известен ряд методов и приборов для оценки и измерения напряжений в металлах и сплавах. Их можно условно разделить на две группы [34]. Первая группа, наиболее разработанная и исследованная, предназначена для измерения усилий и моментов. Элементы изготавливаются из материала с высокими магнитоупругими характеристиками, например, из феррита. Они проверяются, испытываются и до применения тщательно градуируются, поэтому показания таких устройств надежны, имеют высокие метрологические характеристики и с успехом применяются в различных областях техники.

Вторая группа предназначена для измерения напряжений в элементах стальных конструкций, находящихся под действием внешних воздействий, вызывающих возникновение напряжений. Известны способы и приборы измерения напряжений электромагнитным методом, основанные на использовании в основном магнитно-упругого эффекта, который в той или иной степени проявляется в сталях, применяемых для изготовления строительных конструкций.

Среди физических методов измерения внутренних напряжений в элементах стальных конструкций наиболее перспективным является электромагнитный метод [34]. В этом случае информацию о напряженном

состоянии исследуемых объектов получают путем замера изменения характеристик электрических и магнитных свойств, которые зависят, в свою очередь, от деформации кристаллической решетки [39].

В 1866 году Виллари обнаружил изменение кривой намагничивания образцов из стали при действии растягивающих нагрузок [40]. Теоретическую основу измерения напряжений электромагнитным методом и других явлений, связанных с намагничиванием ферромагнитных материалов, создали Н.С. Акулов [41, 42] и С.В. Вонсовский [43, 44].

В линейно-напряженных стальных конструкциях магнитные параметры в направлении действия силы и в поперечном направлении получают приращения разных знаков, т.е. материал становится магнитоанизотропным, и это свойство называется магнитной анизотропией [42].

Приборами магнитной анизотропии устанавливается зависимость между действующими упругими напряжениями и разностью магнитной проницаемости в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Преимущество такого способа заключается в том, что измеряемая разность меньше зависит от колебаний химического состава, структуры металла. Однако анизотропия, даже в близко расположенных точках одного и того же образца, может быть различной и колеблется в широких пределах в зависимости от исходной (до наложения напряжений) магнитной текстуры. Существенным недостатком этого метода является то, что он базируется на не глубоко проведенных теоретических исследованиях.

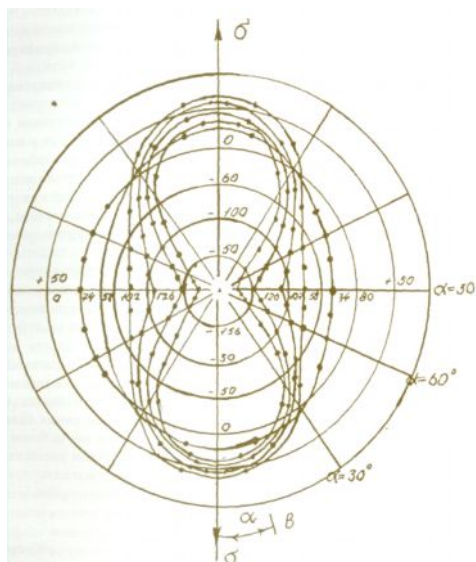
В 1955 году был предложен способ и устройство для измерения напряжений в сталях электромагнитным методом, основанный на измерении магнитной анизотропии [45].

На базе этого способа и устройства выпущены приборы для измерения напряжений. Многие исследователи отмечали, что этот прибор чувствителен к зазору, и в некоторых случаях погрешность измерений достигает 80% [46].

На наш взгляд, недостатки, отмеченные другими исследователями, связаны с тем, что магнитоанизотропный способ и устройство применяются для

измерений напряжений в элементах стальных конструкции имеющих начальные магнитоизотропные свойства, забывая об этом, по-видимому, исследователи применяют прибор и в других случаях ферромагнитных изделий, отсюда неизбежны ошибки и разочарования.

В 1937 году З.Винтергерст [47] опубликовал экспериментальные данные о магнитоупругих свойствах стали с целью оценки их напряженного состояния электромагнитным методом, и тем самым показал, что электромагнитным методом можно исследовать одноосные напряженные состояния. Особый интерес представляет то, что автор создавал магнитные поля под различными углами к направлению вектора главного напряжения. На рис. 2.9 изображена круговая диаграмма, которая наглядно показывает проявления продольных и поперечных магнитоупругих эффектов в растянутых изотропных ферромагнитных изделиях с положительной магнитострикцией и является хорошим экспериментальным подтверждением наших теоретических исследований, приведенных в следующей главе. Следует отметить высокий уровень постановки экспериментов, проведенных автором [47].



Число кривых дает напряжение σ (кН/см²)

Рис. 2.9. Изменения магнитных характеристик конструкционной стали при различном угле α между направлением напряжения и направлением намагничивания

Преобразователь магнитной анизотропии, позволяющий оценивать степень анизотропии магнитных свойств, а следовательно, и уровень упругих напряжений, был разработан и внедрен для измерения крутящихся моментов [48].

В УралпромстройНИИпроекте использовался метод тензодобавок, на основании которого создан специальный прибор ЭМИН-1 [49]. На базе этого прибора проведено внедрение метода измерения нагрузок при определении знака производной функции напряжений при испытаниях ряда металлических конструкций. Метод тензодобавок осуществляется через способ магнитной анизотропии и недостатки, относящиеся к методу магнитной анизотропии, характерны и для этого метода измерения напряжений в растянутых элементах стальных конструкций.

Автор [50] провел исследования возможности измерения напряжений методом вихревых токов в наиболее часто применяемых конструкционных сталях, им же использован гармонический анализ и фильтрация в целях выделения измерительных частей, наиболее чувствительных к напряжениям. Этими экспериментами установлено, что функция измерения токовихревого сигнала от осевых напряжений имеет область неоднозначности, поэтому автором [51] был предложен вспомогательный метод дополнительных нагрузок и разгрузок в целях выяснения знака производной и однозначного установления величин напряжений по тарировочным кривым.

Вместе с тем, авторами не раскрыта теоретическая сущность проявлений магнитоупругого эффекта в ферромагнитных изделиях с положительной магнитострикцией, подвергнутых растяжению, хотя на основе проведенных экспериментов не доказано преимущество проходных электромагнитных преобразователей.

Параллельно с работой [50] проводились исследования возможности применения метода вихревых токов с проходными преобразователями при измерении сдвиговых напряжений [52] в ферромагнитных изделиях, подвергнутых кручению. Автор [50] установил, что для измерения сдвиговых

напряжений в ферромагнитных изделиях необходимо иметь более высокоточную измерительную аппаратуру, чем при измерении растягивающих напряжений. Таким образом, им установлено, что магнитоупругий эффект при кручении ферромагнитных изделий с положительной магнитострикцией проявляется хуже, чем при их растяжении, хотя не даны числовые соотношения между этими магнитоупругими эффектами.

Автор [49, 53], применяя, проходные электромагнитные преобразователи, исследовал возможность электромагнитного метода для прогнозирования устойчивости центрально-сжатых стержней. Используя метод высших гармоник отклика вихревых токов, он усовершенствовал до внедрения электромагнитный метод прогнозирования потери устойчивости при производственных испытаниях металлических конструкций, проведенных для научных целей. Новые экспериментальные данные в области малой гибкости позволили построить зависимость между критическими напряжениями и гибкостью продольно-сжатых стержней, и эта кривая лежит ниже, чем кривые Эйлера [49]. Им начата работа по измерению остаточных напряжений в стальных полосах, сваренных встык.

Вместе с тем на наш взгляд, не полностью раскрыта физическая сущность проявлений магнитоупругих эффектов при продольном изгибе ферромагнитных сжатых стержней с положительной магнитострикцией.

Для анализа напряженного состояния ферромагнитных изделий использован метод высших гармоник [54]. Для измерения напряжений использован «магнитный шум» в ферромагнитных изделиях [55].

Дальнейшее развитие электромагнитный метод измерения напряжений в элементах стальных конструкций получил в работе автора [34].

Как видно из вышеприведенного анализа ранее существующих методов измерений напряжений в элементах стальных конструкций, в деталях машин, в настоящее время отсутствует удовлетворительный метод для решения задач, выдвигаемых практикой. Инженерно-расчетные методы определения напряжений, какими бы совершенными они не были, всегда опираются на

гипотезы и допущения, поэтому полученные результаты о величине напряжений в элементах стальных конструкций необходимо проверить каким-либо экспериментальным методом. Механические разрушающие и частично повреждающие методы не могут быть применены для определения напряжений в элементах стальных конструкций, подлежащих в дальнейшем эксплуатации, так как при этом нарушается герметичность и равнопрочность конструкции. В этом отношении неоспоримое преимущество имеют электромагнитные методы измерения напряжений.

2.3.2 Электромагнитный метод определения напряжений в усиленных элементах металлических конструкций

Известно, что при усилении элементов металлических конструкций гидротехнических сооружений производятся предварительные расчеты, устанавливаются размеры поперечного сечения элементов, которые в дальнейшем будут использованы для усиления элементов металлических конструкций. Как бы точно не проектировалось усиление элементов металлических конструкций, требуется их проверить каким-либо экспериментальным методом. В связи с рыночной экономикой необходимо производить усиление в нужный момент и в нужных местах, с целью предотвращения предполагаемых аварий и катастроф, а также для экономии государственных средств.

Самой достоверной информацией об эффективности принятых мер по усилению элементов металлических конструкций гидротехнических сооружений является величина напряжений в усиленных элементах конструкций. Измерение напряжений в элементах усиления металлических конструкций могут выявить в некоторых случаях, допущенные недоработки на стадии проектирования и изготовления, а также при эксплуатации. Измерение напряжений в элементах металлических конструкций производится различными разрушающими методами [56-58], дающие достоверную информацию о напряженном состоянии элементов металлических конструкций

гидротехнических сооружений. Вместе с тем, при исследовании применяются неразрушающие методы, среди них электромагнитные методы измерения напряжений [59, 60].

При оценке эффективности усиления элементов металлических конструкций гидротехнических сооружений электромагнитным методом принимаются следующие допущения:

- изменения магнитных свойств элементов усиления металлических конструкций при выполнении технологических операции по усилению незначительны или ими можно пренебречь;

- изменение напряженного состояния сравнительно небольшого объема материала, выделяемого из элемента конструкций для установления тарировочной зависимости между напряжением и изменением магнитных свойств материала конструкции не существенны;

- магнитно-упругие свойства материала усиления металлических конструкций сохраняются постоянными.

Измерение напряжений электромагнитным методом при усилении металлических конструкций гидротехнических сооружений 1 можно производить известным преобразователем (рис. 2.10), состоящим из П-образного стального сердечника 2, имеющего намагничивающие 3 и измерительные 4 обмотки, используя измерительную систему приведенной на рис. 2.11 и другими известными электромагнитными преобразователями [34, 61].

Для измерения механических напряжений нами использовались магнитопроводы, источники питания и измерительная часть 5 системы. В эксперименте использовалась мостовая схема с компенсацией напряжения по постоянному току. Мост образован трансформаторами TV1 и TV2. Для уменьшения влияния гармонических составляющих питающего напряжения в цепь включался фильтр L_1-C_1 . Основным узлом измерительной системы являются магнитопроводы TV1 и TV2. Выбор размеров преобразователей зависит от размеров усиливаемых конструкций, а также от поставленной

задачи.

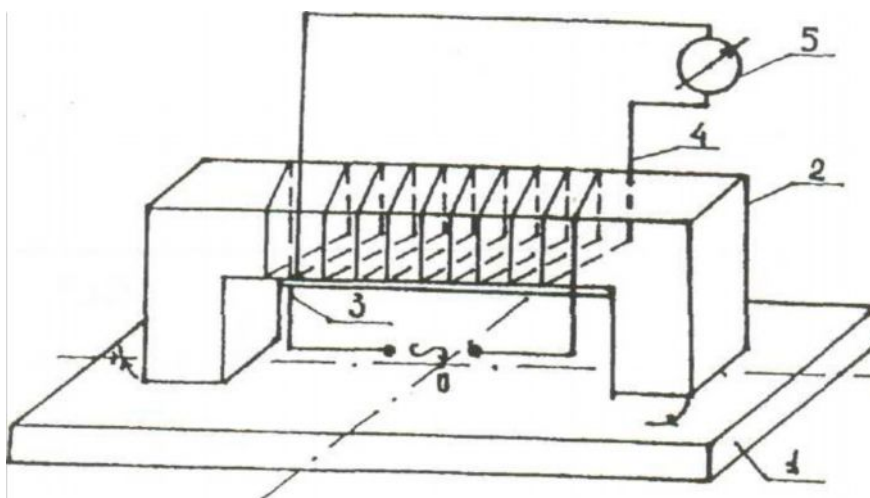


Рис. 2.10. Схема измерительной системы

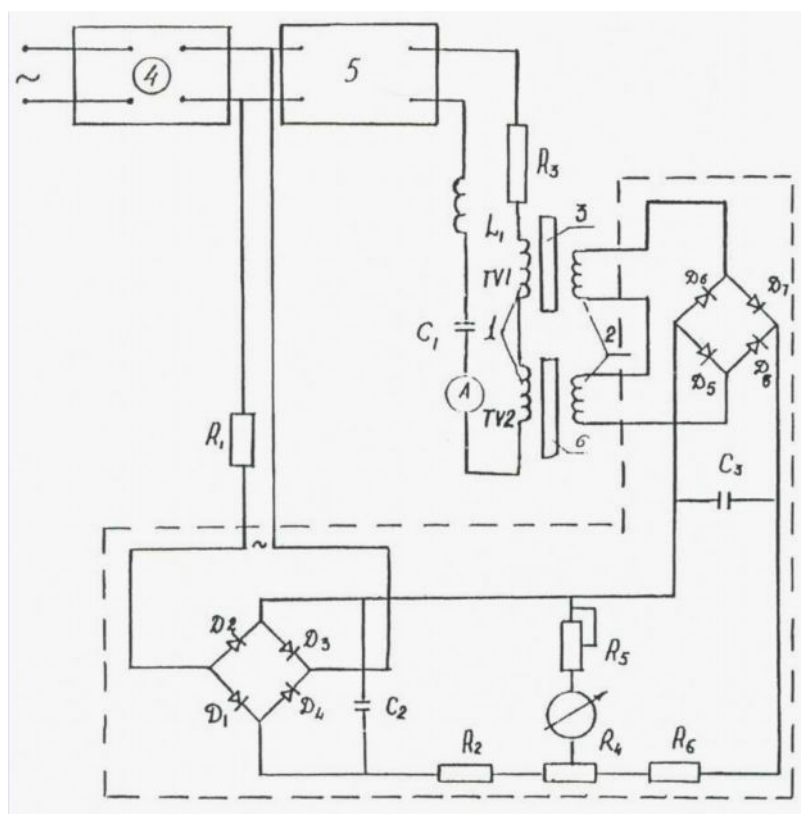


Рис. 2.11. Принципиальная электрическая схема измерительной системы
 1 - намагничивающие обмотки преобразователей; 2 - измерительные обмотки преобразователей; 3 - испытуемый образец; 4 - стабилизатор напряжений; 5 - регулятор напряжений; 6 - эталонный образец.

Для тарировочного испытания использовались тарировочные балки, которые загружаются весовыми гирями. В качестве преобразователей использованы П-образные магнитопроводы, имеющие намагнивающие и измерительные обмотки. Длина магнитопровода 25 мм, ширина 5 мм. Результаты тарировочного испытания приведены на рис. 2.12.

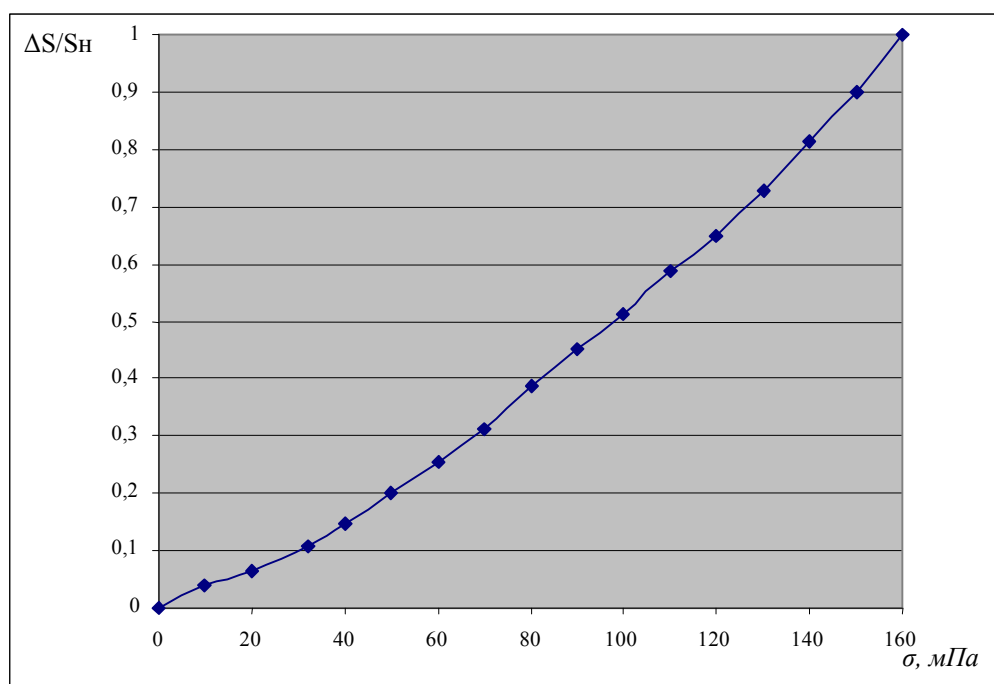


Рис. 2.12. Тарировочная кривая для определения напряжений в элементах металлических конструкций

Ось абсцисс – напряжения, МПа; ось ординат - относительное изменение площади магнитных свойств

Экспериментальные исследования проведены на тарировочных балках после усиления. Для усиления балок использовались листовые стали, вырезанные по размеру тарировочной балки толщиной 2 мм. Результаты измерения напряжений приведены на рис. 2.13.

Для определения напряжений первоначально сняли круговую диаграмму на незагруженном образце, после усиления тарировочной балки и после её загрузки сняли круговую диаграмму с помощью магнитопровода и измерительной системы. Вольтамперная характеристика первого

тарировочного испытания и испытания после загрузки оставались постоянными. Сравнивая площади круговых диаграмм изменения магнитных характеристик испытуемого элемента установили величину относительного изменения площадей, которая была равна $\Delta S/S_H = 0,185$. По тарировочной кривой проводим горизонтальную линию параллельную к оси абсцисс до пересечения с тарировочной кривой, а затем опускаем перпендикуляр к оси абсцисс.

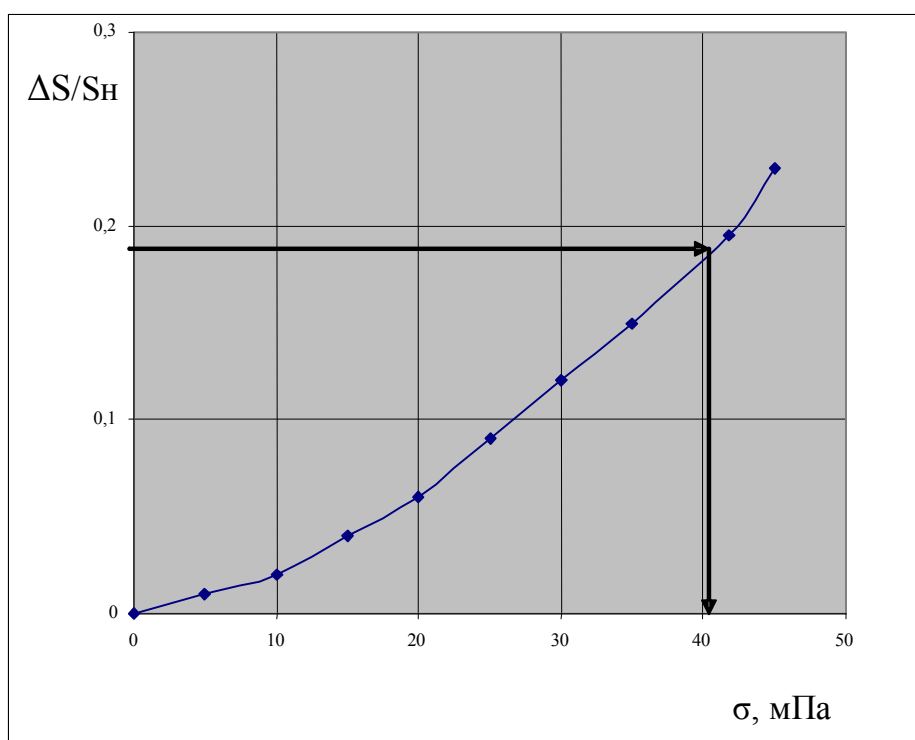


Рис. 2.13. Определения напряжений в элементах металлических конструкций по тарировочной кривой

Результаты эксперимента показали, что напряжение в усиленной балке было равно 40,75 мПа. Теоретическое значение напряжения было равно 41,8 мПа. Абсолютная погрешность – 1,05 мПа, относительная погрешность составляет – 2,51 %. Таким образом, полученное значение напряжений в усиленных элементах металлических конструкций показывает высокую точность измерительной системы. Отклонение объясняется погрешностью, как измерительной системы, так и в процессах вычисления [62].

Выводы по главе

1. Применение тензометрического метода измерения деформаций и напряжений в элементах металлических конструкций гидротехнических сооружений могут показать хорошие результаты. Однако для осуществления на практике предложенного тензорезисторного способа измерения напряжений требуется отыскание эталонного образца и имеется проблема, такая как недостаточная база измерения тензорезисторов.
2. Атопологический метод для оценки напряженного состояния усиленных металлических конструкций гидротехнических сооружений более удобен, чем тензорезисторный способ. Этим способом можно измерять напряжения в нагруженных элементах изделий, когда невозможно найти незагруженный эталонный образец изделия.
3. Электромагнитный метод для оценки напряженного состояния усиленных конструкций гидротехнических сооружений имеет неоспоримое преимущество перед другими методами и способами. Полученные при этом значения напряжений в усиленных элементах металлических конструкций показывают высокую точность измерительной системы электромагнитного метода.

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ КОРРОЗИИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ИХ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ

3.1 Влияние остаточной намагниченности на развитие коррозии

3.1.1 Теория магнетизма

Ферромагнетизм относится к явлениям, которые долго не удавалось объяснить [63].

Впервые Розинг [64] предсказал существование внутренних сил, помогающих намагничиванию. В 1907 г. Вейсс [65] развил эту идею и высказался о существовании ферромагнитных доменов - малых областей в ферромагнетике, каждая из которых намагничена до насыщения вдоль какого-то определенного направления. После этого было предпринято много попыток выяснить физическую природу внутренних взаимодействий, которые описываются гипотезой о молекулярном поле.

В 1928 г. Френкель [66] и Гейзенберг [67] независимо друг от друга показали, как электрические силы, действующие между электронами вещества, могут привести к параллельной ориентации спинов и таким образом создать спонтанную намагниченность.

Френкель и Гейзенберг выдвинули предположение, что ферромагнетизм вызывается электрическим обменным взаимодействием между электронами, локализованными на соседних атомах кристаллической решетки, так называемым прямым обменом [63]. Дополнение ввели Шубин, Вонсовский [68]. Расчеты, выполненные СтUARTом и Маршаллом [69], более точные расчеты в работах [70, 71] и последующие расчеты заставили отказаться от основного предположения в теории Френкеля-Гейзенберга о прямом обмене. Вместо этого предложена зонная теория магнетизма [63].

Вильямс, Бозорт и Шокли предложили новую экспериментальную методику, позволяющую делать видимыми границы ферромагнитных доменов [72,

73]. Теория структуры доменов была развита Ландау и Лифшицем [74], а затем и Неелем [75].

У некоторых переходных металлов при понижении температуры наблюдается явление, имеющее исключительно важное значение как в принципиально научном, так и в практическом отношении. Речь идет о переходе металла в ферромагнитное или антиферромагнитное состояние, в которых, возникает особого вида атомный магнитный порядок [76].

К металлам, в которых при низких температурах осуществляется ферромагнитное состояние, относятся железо (Fe), кобальт (Co), никель (Ni), некоторые редкоземельные металлы, многие сплавы и соединения. Ферромагнетики представляют собой очень сильно магнитные вещества по сравнению с пара-и диамагнетиками, так как возникающая в них намагниченность оказывается на много порядков больше. При этом величина намагниченности I уже не пропорциональна напряженности магнитного поля H и даже не связана однозначно с H , так как при данном H можно получить различные значения I в зависимости от магнитной предыстории образца, т.е. от того, в каком магнитном поле (по величине и направлению) находился этот образец раньше (рис. 3.1). Эта особенность хорошо обнаруживается в явлении магнитного гистерезиса, заключающегося в том, что кривая зависимости намагниченности I от H при уменьшении H не повторяет тех значений I , через которые она проходила при ранее проведенном увеличении напряженности поля. На рис. 3.1 изображена петля гистерезиса, которая получается следующим образом. Будем уменьшать H от значения H_s , соответствующего техническому насыщению, до нуля. Тогда при $H = 0$ намагниченность I будет равно не нулю, а величине I_R (остаточной намагниченности). Далее, чтобы размагнитить образец, приложим поле противоположного направления $H = -H_c$ (величина H_c называется коэрцитивной силой). При дальнейшем увеличении поля обратного направления возникает противоположно направленная намагниченность, и при $H = -H_s$ она тоже достигает значения намагниченности технического насыщения $-I_s$. С уменьшением H до нуля и увеличением (после

изменения направления) до H_s намагниченность изменяется в соответствии с нижней частью петли гистерезиса [76].

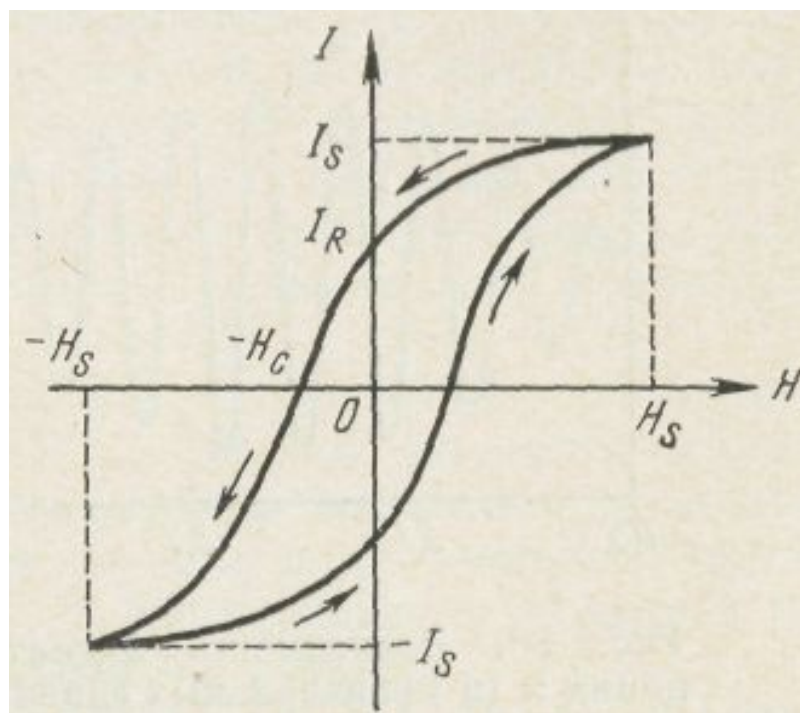


Рис. 3.1. Зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля в ферромагнетиках (петля гистерезиса)

Мы видим, что оказывается возможным случай, когда тело остается намагниченным ($I = I_R$) при $H = 0$. Этот случай реализуется в постоянных магнитах, широко применяемых в электротехнике и приборостроении. Такие постоянные магниты могут сами создавать собственное магнитное поле в отсутствие внешнего намагничивающего поля. Поскольку намагниченность ферромагнитных тел не пропорциональна H , для них магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость оказываются уже не постоянными, а зависящими от H .

Характерной особенностью ферромагнитных веществ является то, что в относительно слабых полях они намагничиваются почти до полного насыщения. Стало быть, в ферромагнетиках существуют силы, которые, преодолевая влияние теплового движения, содействуют упорядоченной ориентации элементарных магнитных моментов.

В ферромагнитных веществах элементарными магнитами являются вращающиеся вокруг своей оси электроны – спины. В соответствии с идеей Вейса считается, что спины, будучи расположены в узлах кристаллической решетки и взаимодействуя друг с другом, создают внутреннее поле, которое в отдельных мелких участках ферромагнитного кристалла (эти участки называют доменами) поворачивает все спины в одну сторону, так что каждый такой участок (домен) оказывается спонтанно (самопроизвольно) намагниченным до насыщения. Однако смежные участки кристалла в отсутствие внешнего магнитного поля имеют неодинаковое направление намагниченности. Вычисления показывают, что, например, в кристаллах железа «самопроизвольное» намагничивание может происходить в направлении любого ребра кубической кристаллической ячейки.

В каждом домене устанавливается намагниченность I , равная намагниченности технического насыщения I_s . Однако векторы намагниченности в разных доменах могут быть направлены различно [76], в результате чего в среднем весь образец может иметь меньшую или даже равную нулю намагниченность.

Слабое внешнее магнитное поле заставляет все спины в домене повернуться в направлении того ребра кубической ячейки, которое составляет наименьший угол с направлением намагничивающего поля. Более сильное поле вызывает новый поворот спинов ближе к направлению поля. Магнитное насыщение достигается тогда, когда магнитные моменты всех спонтанно намагниченных микрокристаллических участков окажутся ориентированными в направлении внешнего поля. При намагничивании поворачиваются не домены, но все спины в них; все спины в каком-либо микрокристаллике поворачиваются одновременно; этот поворот спинов происходит сначала в одних доменах, потом в других. Таким образом, процесс намагничивания ферромагнитного вещества является ступенчатым (рис.3.2)

Экспериментально ступенчатость намагничивания впервые была обнаружена Баркгаузенем (1919 г.) [77].

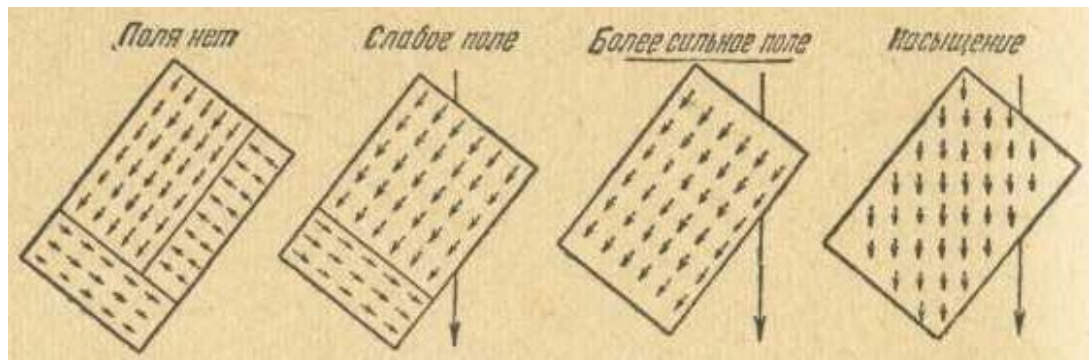


Рис. 3.2. Ориентация спинов в доменах при намагничивании ферромагнетика

Домены были экспериментально обнаружены и исследованы Н.С. Акуловым [42], который использовал для этого разработанный им порошковый метод магнитной дефектоскопии. Поскольку домены аналогичны маленьким магнетикам, на границе между ними поле не однородно. Чтобы выявить очертания доменов, образец размагниченого ферромагнитного вещества помещают под микроскопом и покрывают поверхность образца жидкостью со взвешенной в ней тончайшей железной пылью. Железная пыль, собираясь около границ доменов, четко обозначает их контуры (рис. 3.3).

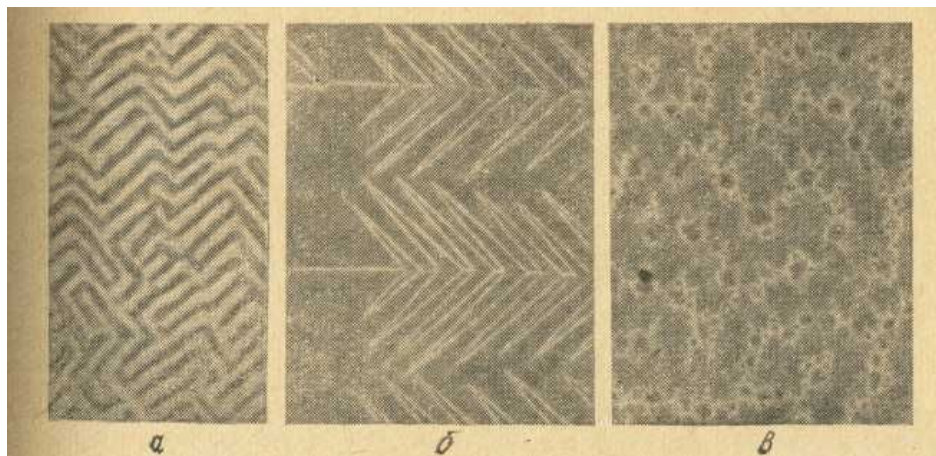


Рис. 3.3. Домены в чистом железе (а), в кремнистом железе (б) и в кобальте (в)

В поясненной выше картине происхождения ферромагнитных свойств некоторое время оставалась невыясненной одна важная часть, а именно природа сил, образующих то внутреннее поле, которое вызывает

упорядоченную ориентацию спинов внутри доменов. В 1927 г. советский физик Я.Г. Дорфман [77] осуществил опыт, показавший, что силы внутреннего поля в ферромагнетиках не являются силами магнитного взаимодействия, а имеют иное происхождение.

Теоретические исследования проф. Я. И. Френкеля (1928 г.) [66] и позже Блоха, Стонера и Слейтера показали, что упорядоченная ориентация спинов в доменах вызывается особыми силами, существование которых было открыто квантовой механикой и которые проявляются при химическом взаимодействии атомов. Эти силы, согласно принятому в квантовой механике способу их вычисления и истолкования, называют обменными силами. Вычисления показали, что энергия обменного взаимодействия между атомами железа в монокристалле в сотни раз превышает энергию магнитного взаимодействия.

Тем не менее, практически наиболее важные свойства ферромагнетиков определяются не столько обменным взаимодействием, но преимущественно магнитным взаимодействием. Дело в том, что хотя существование областей «самопроизвольной» намагниченности (доменов) в ферромагнетиках вызывается обменными силами (упорядоченная ориентация спинов соответствует минимальной энергии обменного взаимодействия, т. е. является наиболее устойчивой), но преобладающие направления намагниченности доменов определяются симметрией кристаллической решетки и соответствуют минимуму энергии магнитного взаимодействия. А процесс технического намагничивания, как пояснено выше (рис. 3.2), заключается в опрокидывании всех спинов внутри отдельных доменов сначала в направлении той кристаллографической оси легкого намагничивания, которая составляет наименьший угол с направлением поля, а потом и в повороте спинов по направлению поля. Затраты энергии, необходимые для осуществления такого ступенчатого опрокидывания спинов поочередно во всех доменах и поворота их по полю, а также ряд величин, которые зависят от указанных затрат энергии (величин, определяющих намагничивание, магнитострикцию и другие

явления), наиболее успешно вычисляются методами, которые разработаны Н.С. Акуловым (с 1928 г.) [42] и Е. Е. Кондорским (с 1937 г.) [63].

Любому стационарному состоянию ферромагнетика соответствует определенное распределение доменов. Расположение границ между доменами отвечает условиям равновесия между внешними и внутренними силами. Равновесие достигается тогда, когда граница занимает положение, в котором сумма энергии внешнего поля, поверхностной энергии границ, магнитоупругой энергии внутренних напряжений от внешних сил, а также энергии внутренних магнитных полей будет минимальной. Если допустить, что внутренние размагничивающие поля малы, можно считать, что положение границ при отсутствии внешнего поля и нагрузок определяется целиком минимумом суммы поверхностной энергии границы и магнитоупругой энергии внутренних напряжений. Всякий ферромагнитный образец представляет собой конгломерат - множество малых областей, каждая из которых намагничена до насыщения в некотором направлении, обычно отличном от направления намагниченности соседних областей [78].

Результирующая или векторная сумма всех намагниченных областей равна нулю, и внешне ферромагнетик при отсутствии внешнего поля кажется ненамагниченным. В реальных условиях разделению кристаллов ферромагнетика на самопроизвольные намагниченные области способствует также магнитная анизотропия и различные неоднородности [79,80]. Фактически существующие в ферромагнитных кристаллах доменные структуры должны соответствовать минимуму суммы всех связанных с этой структурой типов энергии. Этот фактор и определяет доменную структуру в кристаллах.

Магнитные материалы при намагничивании изменяют форму, поэтому их намагниченность должна изменяться под действием механических напряжений. При малых и обратимых изменениях величины индукции под действием напряжения на образец длиной l , при действии намагничивающего поля H , существует известное термодинамическое соотношение [79, 80]:

$$\frac{1}{L} \cdot \frac{dl}{dL} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\partial B}{\partial \sigma} , \quad (3.1)$$

где L - индуктивность;
 B - магнитная индукция;
 σ - напряжение.

Соотношение показывает, что с увеличением натяжения будет возрастать намагниченность ферромагнетика, если он обладает положительной магнитострикцией, и будет убывать при отрицательной магнитострикции.

Результирующая намагниченность при отсутствии внешнего магнитного поля и внутренних напряжений равна нулю и описывается формулой [78]:

$$\sum_{i=1}^n \vec{J}_H V_H \cos \Theta_i = 0 , \quad (3.2)$$

где \vec{J}_H - вектор спонтанной намагниченности домена;
 V_H - объем домена;
 Θ_i - угол между вектором спонтанной намагниченности и направлением напряжений.

При отсутствии внутренних напряжений и под действием вектора напряженности внешнего магнитного поля изменение вектора намагниченности $\Delta \vec{J}_H$ определяется формулой [78]:

$$\Delta J = \sum_{i=1}^n \Delta(\vec{J}_H V_H \cos \Theta_i) = \vec{J}_S \sum_{i=1}^n \cos \Theta_i \Delta V_i + \vec{J}_S \sum_{i=1}^n \cos \Theta_i , \quad (3.3)$$

Первое слагаемое равенства характеризует изменение намагниченности ферромагнетика за счет смещения границ, т.е. за счет изменения объема до-

менов, выгодно ориентированных по отношению к внешнему полю намагничивания, а второе слагаемое возникает за счет вращения вектора спонтанной намагниченности доменов, невыгодно ориентированных к направлению внешнего поля.

При воздействии на ферромагнетик внешних усилий (упругих напряжений) и магнитного поля с напряженностью H векторы спонтанной намагниченности \vec{J}_s стремятся занять некоторое новое устойчивое положение, которое отвечает минимуму свободной энергии доменов [79]:

$$\frac{\partial U}{\partial \alpha_i} = 0, (i = 1, 2, 3), \quad (3.4)$$

где U - свободная энергия доменов;
 α_i - направляющие косинусы.

Под действием механических напряжений полная энергия ферромагнетика изменяется настолько значительно, что механические напряжения наряду с напряженностью магнитного поля и температурой могут считаться одним из основных факторов, влияющих на магнитные свойства. Например, у одних материалов проницаемость в слабых полях под действием растягивающего усилия равна 100 МПа, возрастает в 100 раз [78].

Измерения внутренних напряжений электромагнитными методами тесно связаны с величиной вектора напряженности внешнего магнитного поля. Многие исследователи [50, 51, 60] предлагают проводить измерения внутренних напряжений, применяя векторы напряженности слабых и средних магнитных полей, так как в этих случаях ликвидируются дополнительные энергетические затраты, вызванные применением сильных магнитных полей.

Используя вышеприведенные теоретические данные, рассмотрим проявления магнитоупругих эффектов в поликристаллических ферромагнетиках с положительной и отрицательной магнитоstrictionами при их различных

напряженных состояниях. Приведем данные, полученные другими авторами, и дадим анализ и область эффективного использования проявления магнитоупругих эффектов для анализа напряженного состояния в элементах стальных конструкций, деталях машин и механизмов.

Проявление магнитоупругих эффектов в поликристаллических ферромагнетиках при центральном растяжении изучено многими авторами на предмет измерения напряжений электромагнитным методом.

Зависимость намагниченности от величины приложенного напряжения можно также получить, рассматривая энергию магнитоупругой деформации как функцию от угла, определяющего направления вектора спонтанной намагниченности \vec{J}_s домена \vec{J}_s :

$$U_\sigma = \frac{3}{2} \lambda_s \bar{\sigma}_{ii} \sin^2 \Theta, \quad (3.5)$$

где U_σ - энергия магнитоупругой деформации;

λ_s - магнитострикция насыщения;

Θ - угол между векторами намагниченности насыщения и осью напряжения σ_{ii} .

Из этого выражения следует, что при положительных значениях λ_s и σ_{ii} , как в случае растяжения железа, энергия имеет минимум, при $\Theta = 0$, следовательно, домены устойчивы, когда вектор \vec{J}_s параллелен $\bar{\sigma}_{ii}$, а в случае растяжения никеля энергия имеет минимум при $\Theta = \pi/2$, т.е. домены устойчивы, когда вектор \vec{J}_s перпендикулярен $\bar{\sigma}_{ii}$.

Вследствие этого, намагниченность $\bar{\sigma}_{ii}$ при растяжении железа возрастает, а при растяжении никеля уменьшается.

Применение доменной теории к вопросу, связанному с влиянием напряжений, впервые было сделано в 1930 году Беккером [78]. При этом

рассматривают систему:

$$\begin{cases} U_{\sigma} = \frac{3}{2} \lambda_s \bar{\sigma}_{ii} \sin^2 \Theta \\ U_H = -H \bar{J}_s \cos(\Theta_0 - \Theta) \end{cases}, \quad (3.6)$$

где Θ_0 - угол между напряжением и вектором намагниченности магнитного поля.

Сумма этих энергий имеет минимум когда:

$$\frac{d}{d\Theta} U_{\sigma} - U_H = 0, \quad (3.7)$$

Поскольку $\bar{J} = \bar{J}_s \cos(\Theta_0 - \Theta)$ и из термодинамических отношений [78]:

$$\bar{H} = \bar{H}_0 - \bar{H}_{\sigma}, \quad (3.8)$$

где \bar{H}_0 - напряженность магнитного поля, необходимого для достижения намагниченности J , при $\sigma = 0$;

\bar{H}_{σ} - напряженность магнитного поля, необходимого для достижения намагниченности значения J , при H_0 и при $\sigma_{ii} \neq 0$.

Производя несложные преобразования по формуле, получим:

$$\frac{1}{\chi_0} - \frac{1}{\chi_{\sigma}} = \frac{3\lambda_s}{J_s^2} \sigma_{ii} \frac{\sin 2\Theta}{\sin 2(\Theta_0 - \Theta)}, \quad (3.9)$$

где χ_0 - начальная магнитная восприимчивость;

χ_{σ} - магнитная восприимчивость растянутого ферромагнетика.

Подставляя вместо $(\chi_0, \chi_\sigma)\mu_0$ и μ_σ , получим:

$$\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_\sigma} = \frac{3\lambda_s}{J_s^2} \sigma_{ii} \frac{\sin 2\Theta}{\sin 2(\Theta_0 - \Theta)}, \quad (3.10)$$

где μ_0 - начальная магнитная проницаемость;

μ_σ - магнитная проницаемость растянутого ферромагнетика.

Формула (3.10) является основной исходной формулой, связывающей изменение магнитных свойств с внутренним напряжением и магнитными свойствами ферромагнитных материалов при одноосном растяжении [81]

$$\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_\sigma} = 2c\bar{\sigma}_{ii}, \quad (3.11)$$

где

$$c = \frac{3^{(\lambda_{100})}}{5J_0^2} \left(1 - \frac{51^{(\lambda_{100})}}{14J_0^2} \right) \chi \bar{\sigma}_{ii}, \quad (3.12)$$

где λ_{100} - магнитострикция в направлении 100.

Раскрыв скобки в равенстве и подставив их в формулу (3.11), после преобразования равенства (3.11) получим:

$$\frac{1}{\chi_0} - \frac{1}{\chi_\sigma} = (\bar{\sigma}_{ii})^2, \quad (3.13)$$

где

$$c_1 = \frac{3^{(\lambda_{100})}}{5J_0^2}; \quad c_2 = \frac{153^{(\lambda_{100})}}{70J_0^4} \chi, \quad (3.14)$$

Для слабых полей С.В. Вонсовский [43] предложил формулу:

$$\chi(\sigma) = \chi(0) + k_1 \sigma_{ii} - k_2 \sigma_{ii} - k_2 (\sigma_{ii})^2, \quad (3.15)$$

где $\chi(\sigma)$ - начальная магнитная восприимчивость при действии напряжений, параллельная направлению изменения σ_{ii} ;

$\chi(0)$ - то же при отсутствии напряжений;

$$k_1 = \frac{c_1}{s} \sigma_{ii}; \quad k_2 = \frac{c_2}{(\sigma_{ii})^2};$$

c_1, c_2 - некоторые коэффициенты, зависящие от магнитной текстуры;

σ_{ii} - внутренние растягивающие напряжения.

Сравнивая формулу Акулова (3.13) и Вонсовского (3.15), приходим к выводу, что они имеют одинаковую структуру и показывают взаимосвязь между магнитными свойствами материала и упругими направлениями. Эти формулы часто применяются в исследованиях напряженного состояния ферромагнитных материалов электромагнитными методами.

Из формул (3.13) и (3.15) также видно, что с увеличением величины упругих напряжений возрастает влияние вторых членов, которые содержат $(\sigma_{ii})^2$.

Обычно для сталей это наступает за пределом упругости. Некоторые авторы, используя зависимость (3.6), предложили следующие формулы.

1. При сравнительно больших полях была получена зависимость [82]:

$$\Delta\mu = \frac{1}{\pi} \lambda_s \mu_\sigma \mu_0 \bar{\sigma}_{ii}, \quad (3.16)$$

где $\Delta\mu$ - приращение магнитной проницаемости.

2. В работе [53] автор предложил формулу для определения напряжения:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{\lambda_s}{2\pi J_s^2} \mu_0 \bar{\sigma}_{ii}, \quad (3.17)$$

3. В работе [83] предложена формула для определения касательных напряжений:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = k_1 \mu_0 \tau_{ii} \operatorname{tg} 2\varphi, \quad (3.18)$$

где φ - угол между направлением касательного напряжения и вектора намагниченности \vec{J}_s ;

τ_{ii} - касательное напряжение;

$$k_1 = \frac{3\lambda_s}{4\pi J_s^2}, \quad (3.19)$$

Формулы (3.16) и (3.17) имеют разные коэффициенты, так как они выведены при действии различных по величине векторов напряженности \vec{H} внешнего магнитного поля.

Вышеприведенные формулы используются для измерения напряжений в ферромагнитных материалах электромагнитным методом. Измерение напряжений в ферромагнитных материалах электромагнитным методом производится с помощью тарировочных кривых и эталонного образца, поэтому эти формулы служат как качественные показатели взаимосвязи магнитных свойств и внутренних напряжений.

Магнитоупругие эффекты в растянутых элементах металлических конструкций. Для облегчения исследований проявления магнитоупругих эффектов рассмотрим пример поликристаллического ферромагнетика с

положительной магнитострикцией.

По мнению автора [84] векторы спонтанной намагниченности в поликристаллическом ферромагнетике реагируют на действия растягивающих напряжений. В начальном состоянии магнитные свойства поликристаллического ферромагнетика при отсутствии анизотропии изотропны. При этом векторы спонтанной намагниченности во всех доменах будут совпадать с направлением легчайшего намагничивания, и распределяться равномерно внутри телесного угла, равного 2π (рис. 3.4).

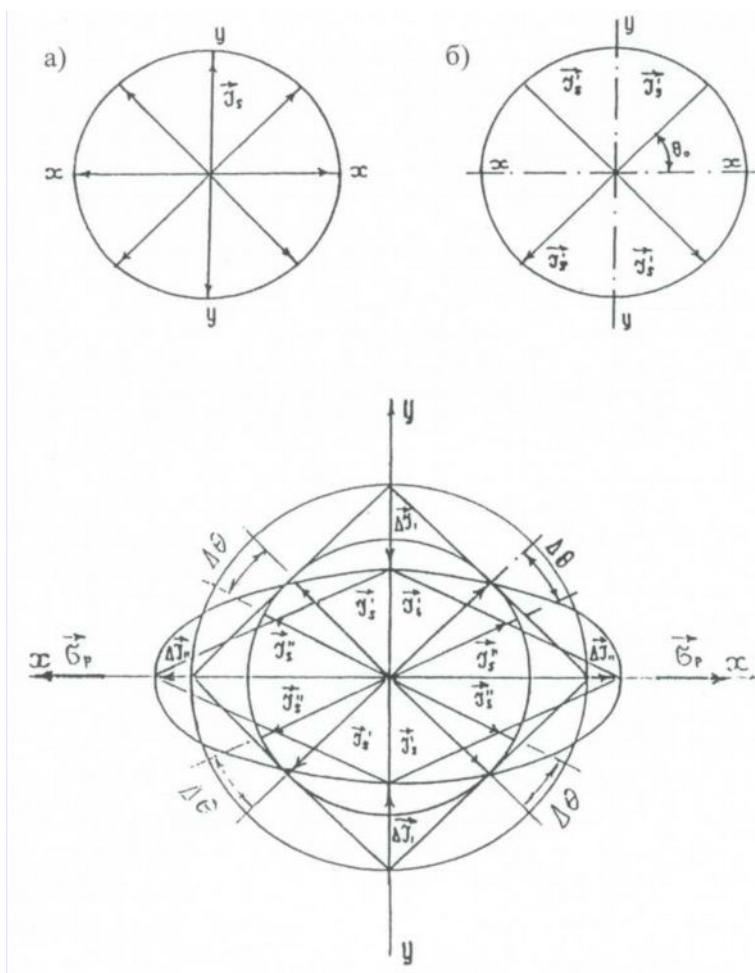


Рис. 3.4. Проявление магнитоупругого эффекта при растяжении изотропных ферромагнитных изделий с положительной магнитострикцией

а) начальное состояние; б) эквивалентное состояние; в) растянутое состояние

Ось абсцисс - направление растягивающих напряжений;

ось ординат - направление, перпендикулярное к напряжению

Технологические процессыковки, прокатки, волочения и др. ферромагнитных сплавов приводят к появлению магнитной анизотропии, т.е. преимущественному распределению \vec{J}_s .

Эти векторы могут быть симметричны относительно главных осей поперечного сечения, а также могут быть распределены под каким-либо углом к главным осям.

Для упрощения доказательств проявления магнитоупругих эффектов, в ферромагнитных материалах при их загрузке, векторы спонтанной намагниченности заменим четырьмя эквивалентными векторами \vec{J}_s . Под действием упругих напряжений эти векторы поворачиваются к направлению напряжений. При растяжении поликристаллических ферромагнетиков с изотропными магнитными свойствами происходят изменения, которые приведены на рис. 3.4.

На этом рисунке наглядно видно проявление продольных (ΔJ_{11}) и поперечных (ΔJ_1) магнитоупругих эффектов в поликристаллических ферромагнетиках с положительными магнитострикциями.

3.1.2 Намагничивание элементов металлических конструкций обладающих ферромагнитными свойствами

Ферромагнетики при намагничивании деформируются. Это явление называется магнитострикцией. Относительное изменение линейных размеров образца при магнитострикции невелико – в полях порядка 10^{-5} а/м ($\sim 10^3 \text{ э}$) оно составляет 10^{-5} - 10^{-6} . Знак эффекта зависит от природы ферромагнетика, ориентации кристаллографических осей по отношению к направлению магнитного поля и от напряженности поля. У некоторых ферромагнетиков, при переходе от слабых полей к сильным знак магнитострикции изменяется на обратный [85].

Если ферромагнетики при намагничивании деформируются, то происходит и обратный процесс, т.е. при нагружении ферромагнитного изделия

изменяются его магнитные характеристики. Этот факт способствовал появлению магнитной дефектоскопии в контроле деталей и конструкций из ферромагнитных материалов. Отсюда можно сделать вывод, что напряжения, появляющиеся при нагружении в ферромагнитных изделиях, и присутствующие в них деформации, трещины, дефекты, дислокации и включения способствуют повреждению магнитных полюсов и разделению доменной структуры.

Согласно изложению [86], что даже при обычных условиях векторы намагниченности нормальны к поверхности и образуют на каждом домене северный или южный магнитные полюсы. Коллоидные частицы собираются у выхода границ доменов на поверхность образца благодаря поперечному магнитному полю, образуемому над границей, как это показано схематически на рис. 3.5.

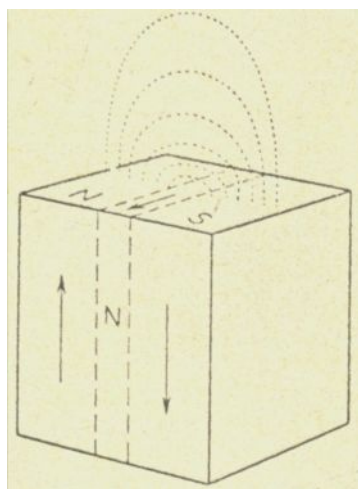


Рис. 3.5. Схематическое изображение поперечного магнитного поля, заставляющего коллоидные частицы собираться у выхода границ доменов на поверхность образца

Магнитный момент является одной из важнейших величин, определяющих магнитные свойства металлов [76]. Атомные частицы обладают магнитным моментом. Магнитный момент может характеризовать способность металла создавать в пространстве вокруг него магнитное поле, а также силу

действия на него внешнего магнитного поля. То есть, созданное магнитное поле в трещинах металлической поверхности и силы в этом поле будут воздействовать на различные частицы.

С учетом вышесказанного в магнитной дефектоскопии используется два физических явления: образование неоднородности магнитного поля в окрестности дефекта и сохранение дипольности магнита. Ферромагнитные частицы притягиваются к дефектам металла как к полюсам магнитов именно из-за этих явлений. При любых надрезах в ферромагнетике образуются полюса. Поле возле трещин или острых вершин называется полем рассеивания. Если намагниченное тело имеет трещину, неоднородность структуры, большой градиент остаточных напряжений, то в их окрестности обязательно имеется поле рассеивания. Магнитные силовые линии всегда замкнуты. Ферромагнитные частицы в окрестности полей рассеивания становятся магнитными и притягиваются к краям трещины как к полюсам магнита [87].

Если внутри намагничиваемого тела имеются неоднородности, например вкрапления вещества с иным значением магнитной проницаемости, трещины, пустоты, то это существенно сказывается на той деформации внешнего намагничивающего поля, которая вызывается намагничиванием такого тела у его поверхности. Посыпая такое тело железными опилками, и слегка встряхивая его, можно заметить, что опилки собираются не только у полюсов намагниченного тела, но и в тех местах его поверхности, под которыми имеются трещины, пустоты или вкрапления постороннего вещества (рис. 3.6) [77].

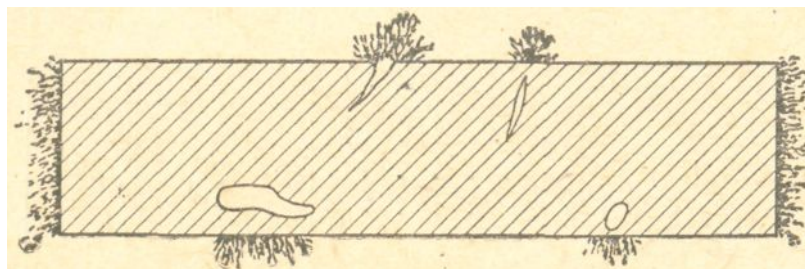


Рис. 3.6. Железные опилки притягиваются к намагниченному телу не только у полюсов, но и вблизи трещин и пустот

3.1.3 Развитие коррозии в элементах металлических конструкций с ферромагнитными свойствами

Предложенные до этого времени механизмы развития коррозии [88-91], хотя и были обоснованы на высоком техническом уровне и описаны с учетом основных факторов развития коррозии, не являются совершенными и не смогут полностью раскрыть механизм развития коррозии. Недостатком всех предложенных механизмов является не учет того факта, что элементы стальных конструкций являются ферромагнитными материалами, в которых в нормальных условиях существуют доменные структуры. Это указывает на то, что до этого времени, никто не учитывал ферромагнитные свойства сталей при изучении коррозии, и это было недоработкой исследователей.

В отличие от существующих механизмов развития коррозии нами [92-93] предложен один из вариантов механизма развития коррозии в элементах стальных конструкций, с учетом их ферромагнитных свойств.

Адсорбция коррозионно-активных веществ из водной среды влияет на уменьшение сродства поверхностных атомов поверхностей стальных конструкций. Под действием различных нагрузок и ударов на ослабленных адсорбцией поверхностях стальных конструкций появляются трещины.

Элементы стальных конструкций являются ферромагнитными материалами, состоящие из доменных структур [42]. В свою очередь, появившиеся трещины и дефекты повреждают доменные структуры в ферромагнитных материалах, в которых при повреждении изменяются магнитные характеристики.

При нарушении доменной структуры стали, происходит разделение доменов на части (рис. 3.7), из-за этого в концах трещин начинают создаваться магнитные полюса [87], а между ними действовать магнитное поле.

Как известно [85], на заряды движущихся в магнитном поле, созданном от нарушенных структур ферромагнитных доменов, то есть между краями трещин, действует сила Лоренца (рис. 3.8), описываемая по формуле

$$\vec{F}_L = q \cdot [\vec{v} \cdot \vec{B}], \quad (3.20)$$

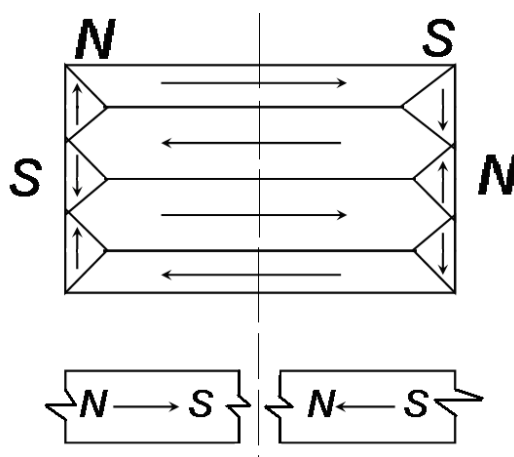


Рис. 3.7. Схема разрушения доменной структуры

В коррозионной среде (вода, влага) присутствуют молекулы воды H_2O , ионы гидроксония H_3O^+ и гидроксила OH^- . Перемещение ионов в среде происходит по особому, так называемому эстафетному механизму [94], который состоит в том, что между ионами гидроксония H_3O^+ и молекулами воды, а также между молекулами воды и ионами OH^- непрерывно происходит обмен ионами водорода H^+ . Под действием силы Лоренца [95] происходит разделение ионов с разными знаками, это способствует дополнительному появлению между краями трещин ионов водорода H^+ и гидроксил-ионов OH^- , то есть диссоциации воды (влаги).

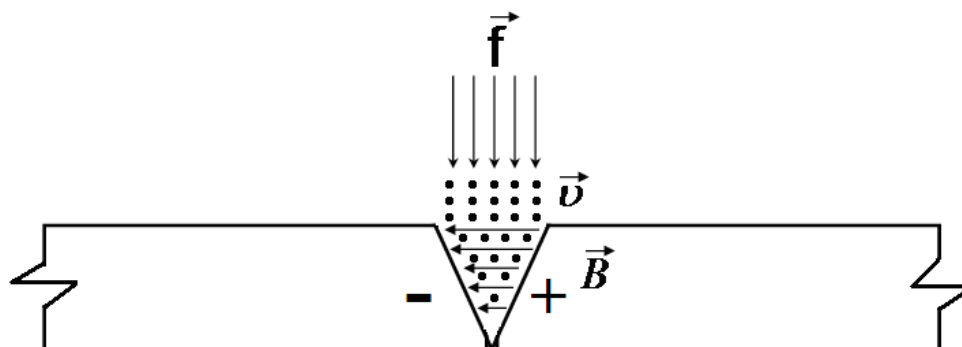


Рис. 3.8. Направления силы Лоренца, скорости движения ионов и магнитного поле касательно трещины в доменной структуре

Кроме этого, сила Лоренца играет важную роль при абсорбции частиц из коррозионной среды. Особенно, интенсивно будут поглощаться трещинами положительные ионы по направлению силы Лоренца. На ионы q движущиеся с определенной скоростью v в магнитном поле B действует сила Лоренца F_L , которая старается повернуть ионы в перпендикулярном направлении (рис. 3.8). За счет силы Лоренца действующем в этом магнитном поле ионы водорода H^+ и гидроксил-ионы OH^- будут притягиваться к краям трещины как к полюсам магнита (рис. 3.9).

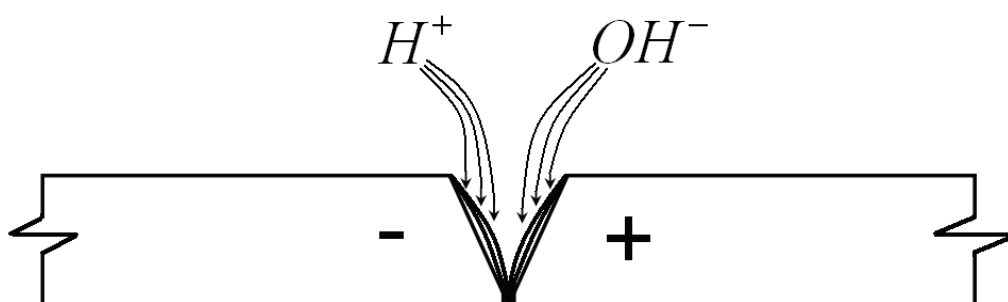


Рис. 3.9. Наполнение трещины доменной структуры ионами H^+ и OH^-

После прохождения физического процесса начинается химический процесс, т. е. реализуется этап развития трещин – их коррозионное зарождение. В трещине из-за недостатка кислорода активно протекает реакция



В результате химической реакции образуется гидроксид железа (II), который создает пленку. Она наполняет образовавшиеся трещины (рис. 3.10), что приводит к замедлению или завершению выше приведенных физических и химических процессов, то есть к пассивации металла. Также, в данном случае активно восстанавливается и абсорбируется водород. За счет силы Лоренца к вершине трещины сильно притягиваются и абсорбируются только ионы водорода H^+ , так как они имеют положительный заряд q ионов.

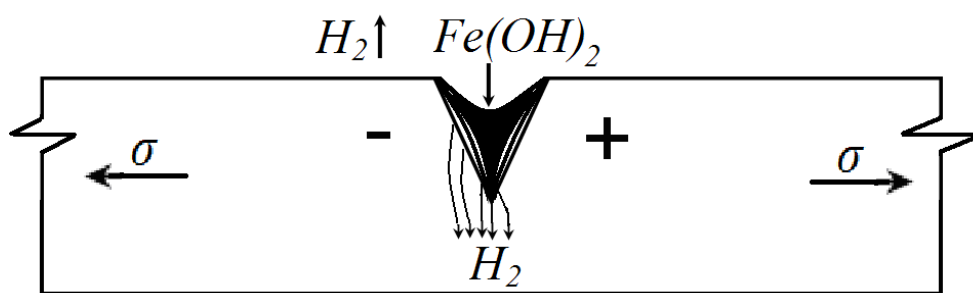
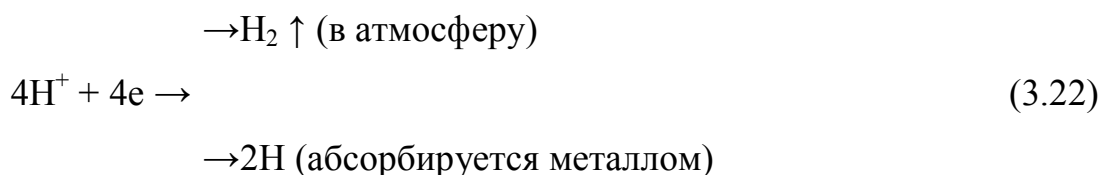


Рис. 3.10. Образованная пленка из гидроксида железа (II) в трещине и восстановление ионов водорода

В трещине ионы водорода H^+ восстанавливаются, и по двум схемам удаляются из трещины, то есть часть абсорбируется в структуру металла через вершину трещины, а остальная часть удаляется как газ в атмосферу:

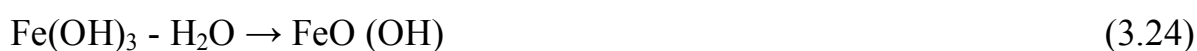


Часть водорода, попавшая в металл, диффундирует по его объему в зону максимальных трехосных напряжений, которая находится перед вершиной трещины. Поступивший в эту зону водород, ускоряет процесс коррозионного подрастания трещины, так как наводороживание металла существенно снижает его коррозионную стойкость (рис. 3.10).

На внешней поверхности оксидной пленки, доступной растворенному кислороду в воде, гидроксид железа (II) окисляется до гидроксида железа (III):



В дальнейшем происходит частичная дегидратация гидроксида железа (III). Данная реакция описана в следующей формуле:



Стальные конструкции работают в постоянных условиях переменных нагрузок (напряжений). При малейшем механическом воздействии - увеличение величин механических напряжений или простое механическое воздействие на элементы стальных конструкций приводит к раскрытию ранее отмеченных трещин, тем самым возобновляется процесс коррозии.

3.2 Развитие коррозии под действием напряжения

3.2.1 Развитие коррозии в растянутых элементах металлических конструкций

Проведенные авторами [96, 97] натурные исследования промышленных зданий и сооружений, а также гидротехнических сооружений [98] показали, что коррозия начинается и преобладает в растянутых зонах элементов металлических конструкций с ферромагнитными свойствами. Для пояснения этого явления нами рассмотрены проявления магнитоупругих эффектов, происходящие в элементах металлических конструкций обладающих ферромагнитными свойствами. Рассмотрим пример поликристаллического ферромагнетика с положительной магнитострикцией (рис. 3.4).

В начальном состоянии магнитные свойства поликристаллического ферромагнетика при отсутствии анизотропии, домены расположены хаотично и магнитные состояния изотропны. При этом векторы спонтанной намагниченности во всех доменах будут совпадать с направлением легчайшего намагничивания, и распределяться равномерно внутри телесного угла, равного 2π (рис. 3.4,а). На плоскости векторы спонтанной намагниченности можно заменить четырьмя эквивалентными векторами \vec{I}_s (рис. 3.4,б). Под действием упругих напряжений эти векторы поворачиваются к направлению напряжений растяжений ферромагнетиков с положительными магнитострикциями. При растяжении поликристаллических ферромагнетиков с изотропными магнитными свойствами происходят изменения, которые приведены на

рис.3.4,в. На этом рисунке наглядно видно проявление продольных (ΔI_{11}) и поперечных (ΔI_1) магнитоупругих эффектов в поликристаллических ферромагнетиках с положительными магнитострикциями [34].

В растянутых поликристаллических ферромагнетиках в зоне когда $\sigma > \sigma_y$ происходят процессы, связанные с явлениями дислокации и пластичности, приведенные академиком Акуловым Н.С. [80]. В структуре стали при растягивающих напряжениях происходит скачкообразный поворот доменов по направлению действующего растягивающего напряжения, то есть поворачиваются все векторы спонтанной намагниченности домена. Когда поворот всех доменов заканчивается, то завершается и упругая стадия работ ферромагнитного материала, а при дальнейшем увеличении напряжений в ферромагнитном материале происходят необратимые процессы, и он работает в упруго-пластической стадии (рис. 3.11). На этой стадии работы ферромагнитного материала под действием растягивающих напряжений происходит нарушение доменной структуры.

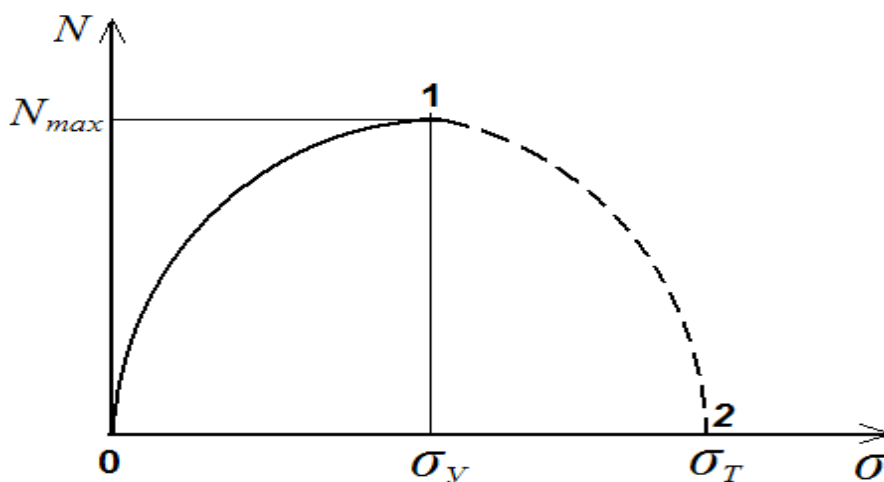


Рис. 3.11. Зависимость интенсивности развития коррозии от напряженного состояния в растянутых элементах металлических конструкций

При нарушении доменной структуры стали, происходит разделение доменов на части, из-за этого в концах трещин начинают создаваться

магнитные полюса, а между ними действовать магнитное поле. Исходя из этого, нами установлен [92, 93] механизм развития коррозии в элементах металлических конструкций. Доказано, что основная роль в развитии коррозии принадлежит силам Лоренца, которые появляются между трещинами, образованными в доменах ферромагнитных материалов. При этом на поверхности элементов металлических конструкций появляются микротрещины, которые пересекают домены, и число растрескиваемых доменов увеличиваются в N раз, равное числу повернутых доменов.

На рис. 3.11 видно, что в точке 1 завершается упругая σ_y стадия работы ферромагнитного материала, где число поворачивающихся доменов максимальна N_{\max} . До предела упругости работы ферромагнитного материала интенсивность развития коррозии в них увеличивается с числом повернутых доменов по направлению действующих напряжений. Далее до предела текучести σ_T в точке 2 процесс коррозии ферромагнитного материала снижается.

Развитие коррозии в растянутых элементах металлических конструкций зависят от напряженного состояния. При напряжениях до предела упругости процесс зависит от числа доменов, повернутых по направлению действующих напряжений, то есть коррозия начинается с физического, а затем развивается химическими процессами. За пределом упругости скорость физического процесса замедляется, и при напряжениях близких к пределу текучести, развитие коррозии зависит всецело только от химического процесса.

3.2.2 Развитие коррозии в сжатых элементах металлических конструкций

Проведенные авторами [99] натурные исследования промышленных зданий и сооружений, а также гидротехнических сооружений [98] показали, что коррозия начинается и преобладает в напряженных (сжатых, растянутых) зонах элементов металлических конструкций. Для пояснения этого явления нами рассмотрены проявления магнитоупругих эффектов, происходящих в сжатых

элементах металлических конструкций обладающих ферромагнитными свойствами. Рассмотрим пример поликристаллического ферромагнетика с положительной магнитострикцией (рис. 3.12, а).

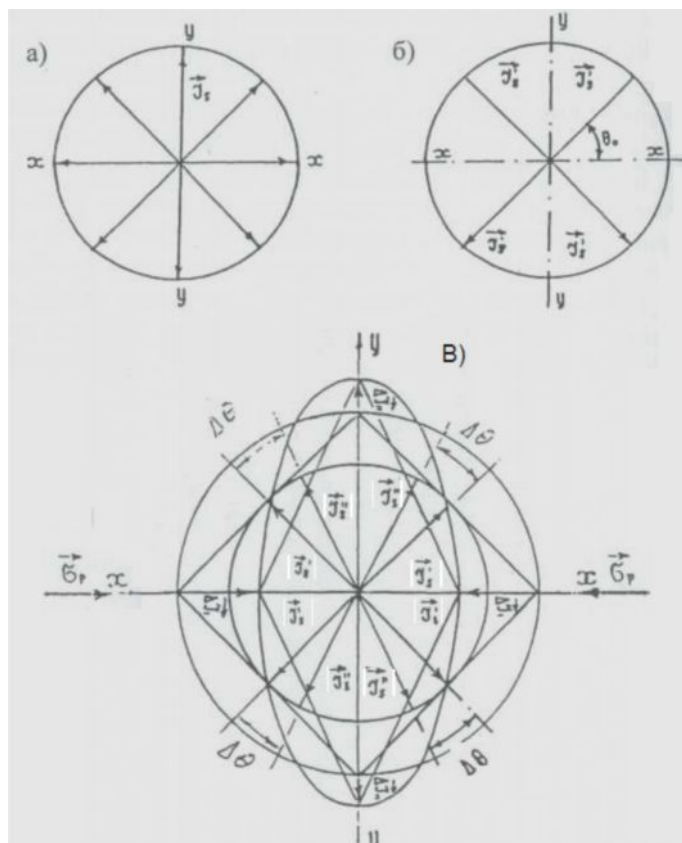


Рис. 3.12. Проявление магнитоупругого эффекта при сжатии изотропных ферромагнитных изделий с положительной магнитострикцией
 а) начальное состояние; б) эквивалентное состояние; в) сжатое состояние
 Ось абсцисс – направление сжимающих напряжений

Проявления магнитоупругих эффектов при сжатии поликристаллических ферромагнетиков с положительной магнитострикцией происходят так же, как при растяжении поликристаллических ферромагнетиков с отрицательной магнитострикцией.

В начальном состоянии магнитные свойства поликристаллического ферромагнетика при отсутствии анизотропии, домены расположены хаотично и магнитные состояния изотропны. При этом векторы спонтанной намагниченности во всех доменах будут совпадать с направлением легчайшего

намагничивания, и распределяться равномерно внутри телесного угла, равного 2π . На плоскости векторы спонтанной намагниченности можно заменить четырьмя эквивалентными векторами \vec{l}_s (рис. 3.12, б). Под действием упругих напряжений эти векторы поворачиваются к направлению напряжений сжатий ферромагнетиков с положительными магнитострикциями. При сжатии поликристаллических ферромагнетиков с изотропными магнитными свойствами происходят изменения, которые приведены на рис. 3.12 [34].

При сжимающих напряжениях, равных пределу упругости в ферромагнитных изделиях с положительной магнитострикцией, домены повернутся в перпендикулярном направлении к напряжению. Таким образом, начальное сферическое магнитное состояние ферромагнитного изделия после загрузки превращается в образный цилиндр, где вектора спонтанной намагниченности направлены по образующей цилиндра (рис. 3.13), ось которого направлена перпендикулярно к напряжению. С увеличением сжимающих напряжений в ферромагнитных изделиях происходят изменения магнитных свойств, эти изменения связаны с нарушением доменной структуры. В ферромагнитном сжатом изделии появляются пластические деформации, которые способствуют нарушению доменной структуры.

В сжатых поликристаллических ферромагнетиках в зоне когда $\sigma > \sigma_y$ происходят процессы, связанные с явлениями дислокации и пластичности, приведенные академиком Акуловым Н.С. [80]. В структуре стали при сжимающих напряжениях происходит скачкообразный поворот доменов по направлению действующего сжимающего напряжения, то есть поворачиваются все векторы спонтанной намагниченности домена. Когда поворот всех доменов заканчивается, то завершается и упругая стадия работ ферромагнитного материала, а при дальнейшем увеличении напряжений в ферромагнитном материале происходят необратимые процессы, и он работает в упругопластической стадии (рис. 3.14) [100]. На этой стадии работы ферромагнитного материала под действием сжимающих напряжений происходит нарушение доменной структуры.

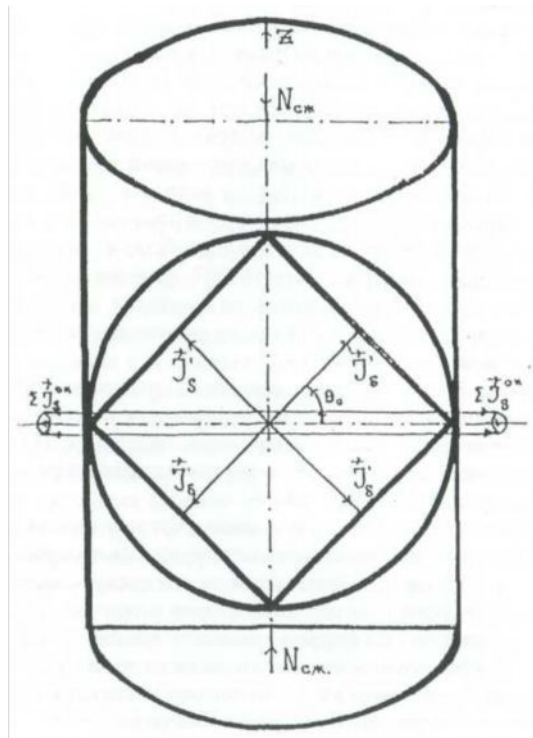


Рис. 3.13. Проявление магнитоупругого эффекта в коротких сжатых ферромагнитных стержнях с положительной магнитострикцией

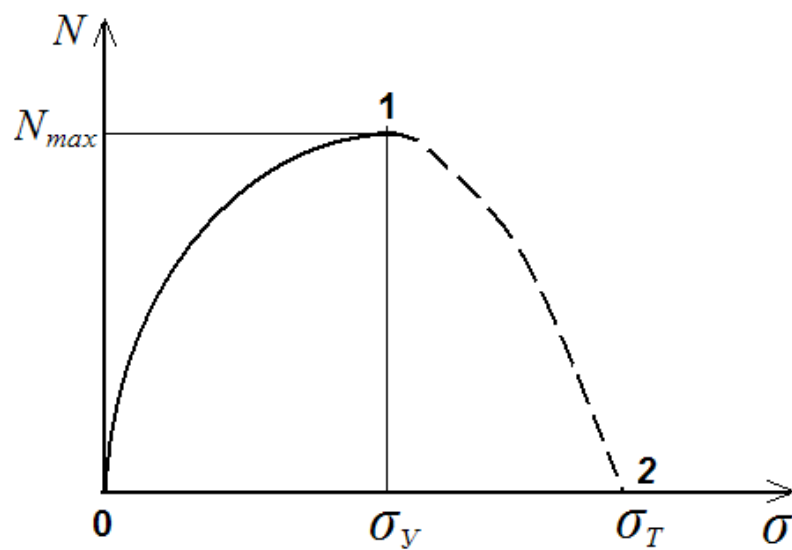


Рис. 3.14. Зависимость интенсивности развития коррозии от напряженного состояния в сжатых элементах металлических конструкций

При нарушении доменной структуры стали, происходит разделение доменов на части, из-за этого в концах трещин начинают создаваться магнитные полюса, а между ними действовать магнитное поле. Исходя из

этого, нами установлен [93] механизм развития коррозии в элементах металлических конструкций. Доказано, что основная роль в развитии коррозии принадлежит силам Лоренца, которые появляются между трещинами, образованные в доменах ферромагнитных материалов. При этом на поверхности элементов металлических конструкций появляются микротрещины, которые пересекают домены, и число растрескиваемых доменов увеличиваются в N раз, равное числу повернутых доменов.

На рис. 3.14 видно, что в точке 1 завершается упругая σ_y стадия работы ферромагнитного материала, где число поворачивающихся доменов максимальна N_{max} . До предела упругости работы ферромагнитного материала интенсивность развития коррозии в них увеличивается с числом повернутых доменов по направлению действующих напряжений. Далее до предела текучести σ_T в точке 2 процесс коррозии ферромагнитного материала снижается.

Развитие коррозии в сжатых элементах, как и в растянутых металлических конструкций зависят от напряженного состояния. При напряжениях до предела упругости процесс зависит от числа доменов повернутых по направлению действующих напряжений, то есть коррозия начинается с физического, а затем развивается химическими процессами. За пределом упругости скорость физического процесса замедляется, и при напряжениях близких к пределу текучести, развитие коррозии зависит всецело только от химического процесса.

3.2.3 Развитие коррозии в изгибаемых элементах металлических конструкций

Проведенные нами натурные исследования промышленных зданий и сооружений, а также гидротехнических сооружений показали, что коррозия изгибаемых элементов происходит своеобразно. Многочисленные данные показывают, что в изгибаемых элементах коррозия начинается в растянутой зоне металлических конструкций (рис. 3.15).



Рис. 3.15. Коррозия балки производственного объекта химического предприятия

Ранее полученные результаты [34] показывают, что в изгибаемых ферромагнитных элементах появляется эффект поперечного намагничивания (рис. 3.16).

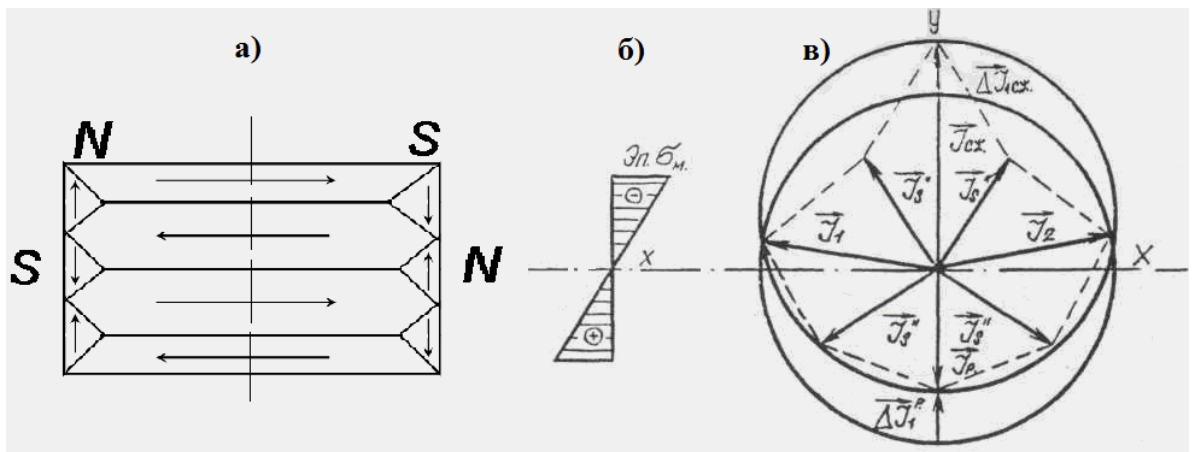


Рис. 3.16. Проявления эффекта поперечного намагничивания при изгибе ферромагнитных изделий с положительной магнитострикцией
 а - начальная доменная структура в ферромагнетике; б - эпюра напряжений;
 в - изменение векторов после изгиба ферромагнетиков
 Ось абсцисс - продольная ось изгибаемого элемента;
 ось ординат - направление, коллинеарное изгибу

Приведенные на рис. 3.16. результаты показывают, что эффект поперечного намагничивания появляется в перпендикулярном направлении к оси изгибаемых элементов. Здесь векторами отмечены результирующие вектора спонтанной намагниченности в ферромагнитных изделиях с положительной магнитострикцией. Таким образом, в растянутой зоне изгибаемых элементов домены располагаются перпендикулярно к прогибу.

Под действием растягивающих напряжений в растянутой зоне появляются микротрещины в перпендикулярном направлений к направлению векторов спонтанной намагниченности доменов. Это в свою очередь приводит к нарушению, т.е. разделению доменов ферромагнитных изделий. Далее происходит установленные [98] физико-химические процессы развития коррозии в элементах металлических конструкций. Стоит отметить, что в появившихся трещинах при изгибе ферромагнитных изделий направления сил Лоренца F_L и вектора эффекта поперечного намагничивания $\vec{J}_{\text{ПОП}}$ совпадают и направлены перпендикулярно к оси изгибаемых элементов (рис. 3.17).

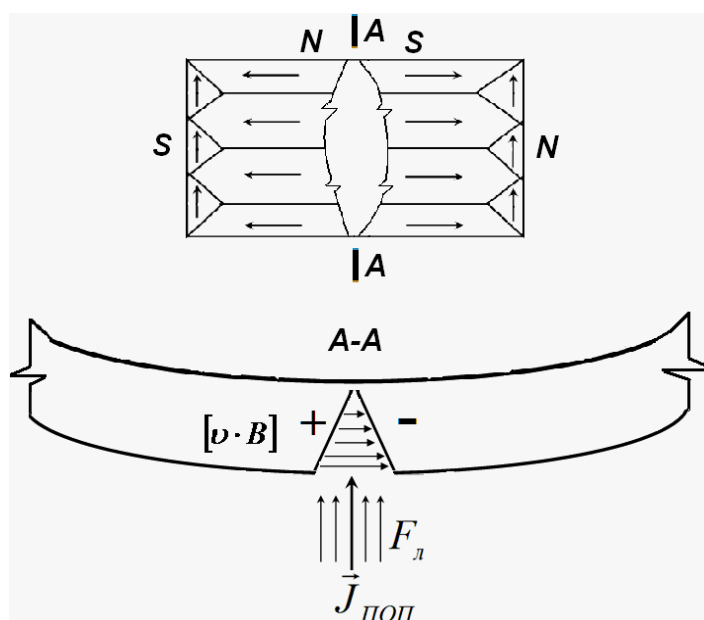


Рис. 3.17. Расположения доменов в микротрещинах растянутой зоны изгибаемых элементов

Данное совпадение векторов показывает, что это явление способствует

интенсивному развитию коррозии именно в растянутых зонах ферромагнитных изделий. Зона появления силы Лоренца в основном концентрируется в средней части растянутой зоны ферромагнитных изделий. Это доказывает, что развитие коррозии в изгибаемых элементах металлических конструкций начинается и превалирует в средней части их растянутой зоны.

3.2.4 Особенность влияния остаточной намагниченности на развитие коррозии

При натурном обследовании элементов металлических конструкций промышленных зданий и сооружений, принадлежащих химической промышленности авторами [101] установлено, что возле технологического оборудования коррозия развивается своеобразно (рис. 3.18, 3.19). Коррозия вокруг их протекает более интенсивно, по сравнению с другими элементами металлических конструкций.



Рис. 3.18. Коррозия подкрановой балки производственного объекта химического предприятия

Многие исследователи не обратили на этот факт внимания. Коррозия металла с ферромагнитными свойствами происходит под влиянием окружающей среды, истории загрузки, а также от его магнитного состояния.

Интенсивность коррозии вокруг технологического оборудования выше, чем далее расположенных участках элементов металлических конструкций. Для пояснения этого явления нами рассмотрены магнитные процессы, происходящие в элементах металлических конструкций обладающих ферромагнитными свойствами.

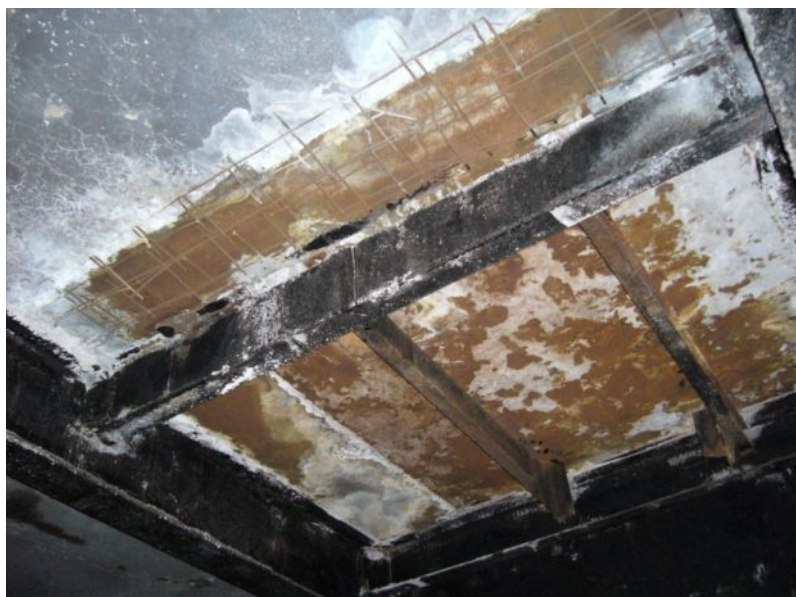


Рис. 3.19. Коррозия металлической площадки производственного объекта химического предприятия

При намагничивании внешними полями напряженностью H металлов с ферромагнитными свойствами магнитная индукция B изменяется не линейно [102].

По нашему мнению, под действием остаточной намагниченности все домены в структурах ферромагнитных изделий будут направлены в одну сторону. От действующих нагрузок на поверхности элементов металлических конструкций появляются микротрещины, которые пересекают домены, и число растрескиваемых доменов увеличивается в N раз, где N – число доменов на поверхности металла (рис. 3.20). Из-за нарушения доменной структуры стали, в концах трещин начинают создаваться магнитные полюса, а между ними действовать магнитное поле. Дальше происходит установленные авторами [98]

физико-химические процессы развития коррозии в элементах металлических конструкций.

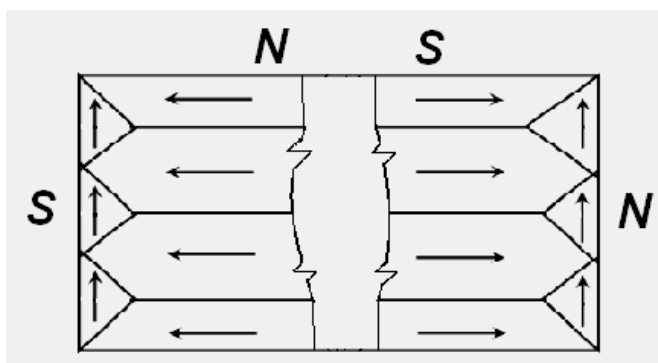


Рис. 3.20. Расположения доменов в микротрещинах элементов металлических конструкций

Этот факт доказывает, что скорость развития коррозии вокруг технологического оборудования, имеющих электропроводные многожильные обмотки, выше, чем на других участках элементов металлических конструкций.

3.3 Особенности развития коррозии в криволинейных участках стальных труб гидротехнических сооружений

Борьба с коррозией стальных труб, применяемых на различных объектах промышленности, заключается в нанесении изоляционных покрытий как внутри труб, так и снаружи. При этом не уделяется внимание на особенности развития коррозии на криволинейных участках стальных труб.

Многолетние наблюдения авторов [98] за развитием коррозии показали, что на криволинейных участках стальных труб различного назначения развитие коррозии происходит более интенсивнее, чем на прямолинейных участках.

Авторами [103] установлен механизм развития коррозии в элементах стальных конструкций в водной среде. Эти исследования показали, что на прямолинейных участках ионы H^+ и OH^- , притягиваясь под действием Лоренцевых сил на полюсы реоменов, начинают химический процесс коррозии в трещинах стальных элементов гидротехнических сооружений.

Имеющиеся трещины с внешней стороны покрываются оксидной пленкой, образуя гидроксид железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$. В дальнейшем происходит частичная дегидратация гидроксида железа. Трещины, наполненные продуктами коррозии на прямолинейных участках меньше подвержены механическим воздействиям от транспортируемой жидкости. Поэтому здесь скорость развития коррозии меньше, чем в криволинейных участках стальных труб. В криволинейных участках стальных труб на подвижные частицы (газы, нефтепродукты, вода или другие жидкости), имеющие определенную массу, действует центробежные силы [104], равные:

$$F = \frac{m \cdot v^2}{R}, \quad (3.25)$$

где m – масса частиц;

v – скорость движения частиц;

R – радиус искривления.

Эти частицы, действуя механически, открывают закрытые первичными продуктами коррозии трещины стальных труб и способствуют дальнейшему развитию коррозии в них.

Для доказательства нами произведены замеры толщин стенок стальных труб как на прямолинейных участках, так и на криволинейных участках [105].

Измерение толщины стенок стальных труб производили ультразвуковым толщиномером УТ-301 по ГОСТу 28702-90. При измерении использован принцип «эхо», т.е. излучатель и приемник совмещены в одной щупе. Возбужденные ультразвуковые сигналы доходят до внутренней поверхности труб и отражаются приемником, зная скорость распространения и время прохождения ультразвука на металле, определили толщину стенок. Результаты замеров приведены в таблице 3.1.

По результатам замеров установили скорость развития коррозии в

криволинейных участках стальных труб. Всего произведено 11 замеров, средняя толщина стенок на замеренных участках составляет – 5,409 мм.

Таблица 3.1 - Результаты замеров толщины стенок стальных труб, подверженных внутренней коррозии

№ точки замера	Величина замера, мм			Среднее значение 3-х замеров	Толщина стенки с учетом погрешности	Проектная толщина стенки, мм	Отбраковочный размер, мм	Примечание
<i>Криволинейные участки</i>								
1	5,4	5,4	5,4	5,4	5,3	10	-	-
2	5,4	5,4	5,4	5,4	5,3	10	-	-
3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,2	10	-	-
4	7,0	7,0	7,0	7,0	6,9	10	-	-
5	4,1	4,1	4,1	4,1	4,0	10	-	-
6	5,4	5,4	5,4	5,4	5,3	10	-	-
7	6,0	6,0	6,0	6,0	5,9	10	-	-
8	5,6	5,6	5,6	5,6	5,5	10	-	-
9	5,5	5,5	5,5	5,5	5,4	10	-	-
10	5,6	5,6	5,6	5,6	5,5	10	-	-
11	5,3	5,3	5,3	5,3	5,2	10	-	-
<i>Прямолинейные участки</i>								
1	8,4	8,4	8,4	8,4	8,3	10	-	-
2	8,5	8,5	8,5	8,5	8,4	10	-	-
3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,2	10	-	-
4	8,3	8,3	8,3	8,3	8,2	10	-	-
5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,4	10	-	-

Средняя скорость развития коррозии в криволинейных участках равна:

$$\frac{10 - 5,409}{30} = 0,15 \text{ мм / год} , \quad (3.26)$$

где 10 – проектная толщина стенки трубы;

30 – срок службы трубы.

Максимальная скорость развития коррозии в криволинейных участках:

$$\frac{10 - 4,0}{30} = 0,2 \text{ мм / год}$$

Минимальная скорость развития коррозии в криволинейных участках:

$$\frac{10 - 6,9}{30} = 0,103 \text{ мм / год}$$

Что касается прямолинейных участков: было произведено 5 замеров, средняя толщина стенок на замеренных участках составляет – 8,3 мм.

Средняя скорость развития коррозии в прямолинейных участках равна:

$$\frac{10 - 8,3}{30} = 0,056 \text{ мм / год}$$

Сопоставление результатов замера стенок труб показало, что в криволинейных участках стальных труб коррозия развивается в 2,67 раза быстрее, чем в прямолинейных участках, что доказывает ранее приведенные нами суждения.

Выводы по главе

1. Во всех проведенных исследованиях по коррозии не учтен тот факт, что металлические конструкции являются ферромагнитными изделиями, в которых в нормальных условиях существуют доменные структуры. На коррозию

металлических конструкций влияют магнитные свойства металлов.

2. Развитие коррозии в растянутых и в сжатых элементах металлических конструкций зависят от напряженного состояния, при напряжениях до предела упругости процесс зависит от числа доменов повернутых по направлению действующих напряжений. За пределом упругости скорость физического процесса замедляется, и при напряжениях близких к пределу текучести, развитие коррозии зависит всецело только от химического процесса.

3. Развитие коррозии в изгибаемых элементах металлических конструкций начинается и превалирует в средней части их растянутой зоны, где в основном концентрируется зона появления силы Лоренца.

4. Скорость развития коррозии вокруг технологического оборудования, имеющие электропроводные многожильные обмотки, выше, чем на других участках элементов металлических конструкций.

5. Внутренние трещины труб, наполненные продуктами коррозии на прямолинейных участках меньше подвержены механическим воздействиям от транспортируемой жидкости. Поэтому здесь скорость развития коррозии меньше, чем в криволинейных участках стальных труб. В криволинейных участках стальных труб на подвижные частицы (вода или другие жидкости), имеющие определенную массу, действует центробежные силы. Эти частицы, действуя механически, открывают закрытые первичными продуктами коррозии трещины стальных труб и способствуют дальнейшему развитию коррозии в них.

ГЛАВА 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЮ И ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

4.1 Рекомендации по повышению долговечности металлических конструкций гидротехнических сооружений

Контроль, повышение надежности и долговечности металлических конструкций гидротехнических сооружений - одна из основных задач эксплуатационных служб. Но за годы экономического застоя, все до исключения металлические конструкции гидротехнических сооружений изрядно изнашивались, повреждены коррозией, имеют непоправимые дефекты, деформированы, а также морально устарели. Государство не в силах отремонтировать и реконструировать даже четверть из имеющихся на гидротехнических сооружениях металлических конструкции. По информации СМИ, проверка прокуратуры по Восточно-Казахстанской области показала, что 50% гидротехнических сооружений требует ремонта. В связи с этим, перед всеми специализированными организациями и эксплуатационниками гидротехнических сооружений стоит проблема сохранить и поддерживать в рабочем состоянии металлические конструкции и другие сооружения. Для этого, в данное время требуется, провести техническое обследование и определить техническое состояние всех металлических конструкции гидротехнических сооружений, то есть дать оценку их работоспособности. Только проведя данные исследования можно рационально и эффективно планировать дальнейшие эксплуатационные мероприятия для металлических конструкций и даже для сооружения в целом.

По результатам наших исследований в большинстве гидротехнических сооружений металлические конструкции имеют коррозионные повреждения, снижающие надежность и долговечность. В некоторых сооружениях коррозия развита настолько, что требуется замена затворов, трубопроводов, закладных частей и других элементов. Процесс коррозии металлов сложен тем, что в

обычных условиях металлы термодинамически постоянно стремятся корродировать. Хотя этот процесс нельзя полностью остановить, его можно значительно замедлить на определенное время. Вопросами коррозии с незапамятных времен занимается множество ученых, и ими определено большое количество способов и методов защиты металлов от коррозии.

Защита стальных конструкций от коррозии в потоке пресной воды является важной задачей гидротехнического строительства. Исследования [24] показали, что механизм коррозии определяется высоким содержанием в воде растворенного кислорода, ее жесткостью и активностью, определяемой концентрацией водородных ионов (рН), а также воздействием продуктов жизнедеятельности живых организмов-обрастателей.

Ввиду того, что на каждом гидросооружении имеются свои особенности, активность развивающихся коррозионных процессов, являющихся следствием этих особенностей, различна. На одном и том же гидросооружении коррозионные повреждения не одинаковы для оборудования разного назначения, они различны даже на одном затворе. Так, коррозия развивается значительно быстрее и разрушения достигают больших размеров в местах, которые все время находятся под водой, а на участках, находящихся на воздухе, коррозия слабее. Поэтому защитные меры должны назначаться с учетом причин, влияющих на коррозионные процессы, а защитные покрытия должны хорошо сопротивляться внешним силам, разрушительно действующим на них в определенных условиях.

Нами предложены следующие основные мероприятия и методы защиты металлических конструкций гидротехнических сооружений.

1. Современное качественное проектирование. Совершенно справедливо утверждение, что противокоррозионная защита металлоконструкций начинается в конструкторских бюро. Это особенно справедливо для металлических конструкций и оборудования, работающих в речной воде, скорость коррозионных процессов в которых во много раз больше, чем на воздухе. Совокупность указанных причин вызывает на поверхности металлических

конструкций неравномерную коррозию в виде конусообразных наростов, под которыми располагаются каверны-язвы глубиной в несколько миллиметров. То есть при проектировании металлических конструкций гидротехнических сооружений требуется учесть все факторы, влияющие на коррозию и разработать комплекс современных мероприятий по их защите до полного физического и морального износа.

2. Правильная эксплуатация и контроль надежности металлических поверхностей. Самый основной и главный способ защиты от коррозии металлических конструкций гидротехнических сооружений - это его правильная эксплуатация. То есть металлические конструкции должны эксплуатироваться с учетом всех до единого требований к ним. Отклонение от нормальной эксплуатации может привести к большим материальным ущербам, авариям и отказам. Сделанный анализ показал, что неправильная эксплуатация, которая приводит к снижению надежности и долговечности металлических конструкций составляет большую долю [4, 34, 106]. Контроль состояния металлических конструкций гидротехнических сооружений осуществляется комплексом мероприятий, выполнение которых должно существенно повысить долговечность и надежность. Некоторые из них приведены в таблице 4.1 [4].

В процессе контроля металлических конструкций, как правило, используют комплект различных приборов и приспособлений, например предназначенный для определения напряжений и усилий в элементах оборудования при его работе, для измерения потребляемой мощности привода, температуры в подшипниках и т. д.

В процессе обследования определяют состояние антикоррозионного покрытия, процент его износа. Толщину антикоррозионного покрытия определяют при помощи электроиндукционных толщиномеров. Для металлоконструкций, работающих в воде, толщина покрытия должна быть не менее 120—140 мкм, для металлоконструкций, работающих на воздухе — не менее 75—80 мкм. Достаточность адгезии антикоррозионного покрытия оценивают методом решетчатых надрезов по [4].

Таблица 4.1 - Контроль состояния элементов металлических конструкций гидротехнических сооружений

Выявляемые показатели	Приборы, приспособления, методы контроля
Оценка состояния антикоррозионного покрытия: - толщина покрытия - адгезия покрытия	Измерение толщины покрытия: электроиндукционные толщиномеры МТ-30Н, МТ-20Н; Ультразвуковые и рентгеновские толщиномеры. Оценка адгезии покрытия: скальпель или лезвие, шаблон с прорезями, кисть мягкая
Оценка характера и вида износа металла (коррозионный, кавитационный, абразивный), выявление наиболее изношенных участков, вмятин на несущих конструкциях	Линейка стальная измерительная, рулетка, измерительные скобы, штангенциркуль
Определение фактических размеров катетов сварных швов и головок заклепок	Наборы шаблонов для швов и головок заклепок
Определение состояния заклепочных и болтовых соединений	Молоток (масса около 1 кг)
Выявление микродефектов сварных швов (непровары, прожоги, наплывы, каверны, наружные микротрещины и пр.), а также основного металла	Молоток (масса около 1 кг), лупа измерительная ЛИ-3, ЛИ-4 и пр.
Уточнение качества сварных соединений и металла (выявление микродефектов, не выявляемых внешним осмотром)	Капиллярный метод: цветной метод, люминесцентный метод ПЛД-2 и др. Ультразвуковой метод: УДМ-1М, УДМ-3 и др. Магнитопорошковый метод: ДКД, УМДЭ-2500, УПД-1, ПМД-70 и др. Магнитоиндукционный (токовихревой) метод: ТВ Д-Р, ТВДР-1М и др.
Определение перемещений (прогиба, просадки) элементов металлоконструкций; определение правильности положения ворот, затворов по отношению к строительной части	Тахеометр, теодолит, нивелир, рейка нивелирная, проволока струнная стальная, линейка стальная измерительная, уровень (с микрометрической подачей ампулы), отвесы, обратные отвесы
Определение износа (коррозионного, кавитационного, абразивного); оценка несущей способности	Измерение фактической толщины металла: ультразвуковые толщиномеры «Кварц-6», «Кварц-15», УТ-30ПУ и др.; механический толщиномер, изготавливаемый на базе индикатора часового типа, рулетка, дрель
Определение напряжений в элементах металлоконструкций	Тензорезисторы, усилитель, осциллограф; механические тензометры, различные измерительные преобразователи и системы

В месте определения состояния покрытия, скальпелем или лезвием

делают надрезы в виде решетки: не менее пяти параллельных надрезов на расстоянии 2 мм друг от друга и не менее пяти параллельных надрезов на таком же расстоянии в поперечном направлении. Адгезионные свойства антикоррозионного покрытия оценивают в баллах:

Края надрезов гладкие, отслоившиеся кусочки покрытия отсутствуют.....	1
Отслаивание покрытия незначительно в виде точек вдоль линии надрезов или в местах их пересечения.....	2
Покрытие отслоилось вдоль линии надрезов или полос на поверхности до 35% площади решетки.....	3
Покрытие отслоилось полностью или частично полосами или квадратами на поверхности более 35% площади решетки.....	4

Покрытие, соответствующее высоким баллам, считается непригодным.

3. Как и рассматривалось в предыдущих главах, возникновение коррозии под напряжением в водных средах во многих случаях зависит от факторов, контролировать которые довольно трудно. К ним относятся определенные авторами [93] реоменные структуры [107], появляющиеся от нагрузок и ударов на поверхности металлических конструкций гидротехнических сооружений. Избежать появления реоменных структур можно следующими способами:

- выбор материала и термическая обработка металла;
- учет вида нагрузки на металл и остаточной деформации;
- обработка поверхности;
- недопущение воздействия на металлические конструкции ударов, нагрузок и напряжений, от которых образуются реоменные структуры.

4. Отделение металла от агрессивной среды антикоррозионным покрытием (лакокрасочные пленки, металлизация и др.). Так же, как и поверхностную коррозию, разрушение можно предотвратить защитой поверхности плакированием, гальванопокрытиями, металлизацией распылением, анодированием, покраской, органическими покрытиями и т. д.

Во многих гидротехнических сооружениях в качестве защиты стальных

конструкции от коррозии используются металлические покрытия. Они должны вести себя как аноды по отношению не только к основному материалу, но и к уязвимым местам (например, к трещинам и дефектам). Желательно также, чтобы покрытия препятствовали образованию опасных агентов. Иногда покраска даже способствует коррозии под напряжением. Коррозия под напряжением в водной среде надежно устраняется тогда, когда агрессивной среде закрыт доступ к материалу.

Для того чтобы коррозия вообще не могла развиваться, необходимо металлическую поверхность надежно изолировать от воды. Следовательно, защитное покрытие должно быть, прежде всего, водонепроницаемым и сохранять это свойство в продолжении длительного времени. Покрытие должно противостоять разрушающему действию текущей воды различного, иногда достаточно агрессивного химического состава и хорошо сопротивляться размыву и истиранию текущей речной водой, в которой всегда имеется некоторое количество взвешенных абразивных частиц. Покрытие должно обладать хорошей адгезией к металлу, быть эластичным и достаточно твердым. Весьма важное свойство, которым должно обладать покрытие — это способность не разрушаться под действием электрического тока, могущего возникнуть на поверхности металла при случайном проникновении воды.

Поскольку затворы могут быть подняты из паза и летом и зимой, покрытие должно обладать достаточной атмосферостойкостью и хорошо сохраняться при отрицательных температурах, а в случае, когда гидроузел расположен в субтропическом климате — хорошо сопротивляться солнечной радиации. Если оборудование установлено на сооружениях, расположенных на реках, где развита ракушка-дрейссена, покрытие должно обладать еще и противообрастающими свойствами. Критерием пригодности того или иного лакокрасочного покрытия является стабильность во времени его первоначальных физико-механических свойств, в наиболее полной мере удовлетворяющих перечисленным выше требованиям.

Для всего оборудования и металлических конструкций гидротехнических

сооружений применяется способ защиты с применением лакокрасочных покрытий. Однако такое решение не во всех случаях обеспечивает экономичность защиты. Так, в атмосфере и зоне периодического смачивания металлоконструкции необходима и достаточна окраска декоративными красками. Скорость коррозии стали в этих зонах мала, и обычный срок службы конструкций обеспечивается и без специальной антикоррозионной защиты. Стоимость лакокрасочных покрытий достаточно высока. Основную часть ее составляют монтажные и транспортные работы по перемещению конструкций на окрасочную площадку, а также различные способы их очистки.

Чем больше срок службы красок, тем выше их экономические показатели даже в тех случаях, когда для достижения повышенной стойкости покрытий приходится применять более дорогую технологию. Для повышения эффективности покрытий стойкие краски следует сочетать с тщательной предварительной очисткой и фосфатированием защищаемой поверхности. Сроки службы покрытий значительно повышаются усилением их смазками там, где это не мешает основным операциям по обслуживанию оборудования.

Лакокрасочные покрытия можно также рекомендовать и для элементов оборудования, лишь периодически контактирующих с водой и значительное время находящихся в атмосфере (например, ремонтные заграждения). Демонтаж и перекраска их осуществимы без значительных трудностей. Защитные покрытия для этих элементов должны обладать большой атмосферо- и морозостойкостью и одновременно высокой водостойкостью.

Эффективность применения лакокрасочных покрытий на элементах, непрерывно контактирующих с водой, низка. Покрытия должны противостоять воздействию быстро движущейся воды, обрастанию, ударам льда и плавающих предметов: в местах повреждения покрытия быстро развиваются коррозионные процессы.

Так как, коррозия под напряжением в водной среде начинается в реоменных структурах, где от нагрузок и ударов защитные пленки и основной металл растрескивается, требуется, чтобы даже при образованных трещинах

защитные покрытия сохраняли металл от коррозии. Этого достичь очень трудно. С учетом установленного [92, 93] механизма развития коррозии под напряжением в стальных конструкциях, мы предлагаем следующий способ нанесения защитных покрытий [108]:

- перед тем как на поверхность нового элемента стальной конструкции гидротехнических сооружений наносится покрытие в заводских условиях, зная по опыту эксплуатации данного элемента его напряженно-деформированную работу, максимально допустимо нагружаем его нагрузкой приближенной к натурным условиям. При этом на его поверхности должны появиться полосы скольжения, дислокации, трещины, неоднородности, дефекты и другие повреждения;
- удерживая элемент в данном состоянии, тщательно наносим на его поверхность первый слой антикоррозионного покрытия, контролируя при этом заполнение покрытием всех образованных трещин и дефектов, и высушиваем его в соответствии со всеми требованиями;
- после этого снимаем нагрузку, проверяем качество покрытия, и наносим второй слой антикоррозионного покрытия на всю поверхность;
- проверяем качество покрытия и при необходимости опять повторяем вышеуказанные мероприятия.

При выполнении вышеуказанных мероприятий по нанесению защитных покрытий, нагруженные в натуральных условиях и водной среде поверхности стальных конструкции гидротехнических сооружений будут защищаться эффективнее и увеличится их долговечность. Так как, при растягивающих нагрузках ранее образованные при нанесении покрытия в заводских условиях трещины и дефекты будут заполнены покрытием, то это не позволит адсорбироваться агрессивным веществам из водной среды, которые способствуют интенсивной коррозии.

В настоящее время исследователи и производители антикоррозионных покрытий интенсивно работают над так называемыми «умными» покрытиями, которые при повреждениях металлических поверхностей обладают свойством

самовосстановления. При этом использования цинковых, синтетических, органических и других покрытий с использованием нанотехнологии и передовых технологии являются перспективным направлением.

Нанонаука и нанотехнология стали наиболее востребованными и престижными в последние десятилетия, хотя исследования в нанохимии и нанофизике ведутся уже около полувека, а ряд наноматериалов известен еще с древности.

Основные разработки в этой области должны быть направлены на создание новых, более прочных, легких и дешевых строительных материалов, а также улучшение уже имеющихся материалов: металлоконструкций и бетона, за счет их легирования нанопорошками.

Другое направление практического применения нанотехнологии в гидротехническом строительстве — различного рода защитные покрытия от коррозии, основанные на реализации эффекта лотоса и биоцидные материалы.

Формирование наноструктур на поверхностях может быть выполнено с помощью нескольких основных технологий [109]:

- лазерным лучом или плазменным травлением;
- путем анодного окисления (алюминий) с последующим покрытием, например, гексадецилтриметоксиланом;
- приданием формы и созданием микрорельефа гравировкой;
- покрытием поверхности слоем металлических кластеров, комплексов «поверхностно-активное вещество — полимер» или трехблочных сополимеров, самоорганизующихся в наноструктуры;
- покрытием дисперсией наночастиц с морфологией, не образующей агломератов.

Крупнейшая задача индустрии покрытий - замедлить влияние коррозии на металлические конструкции. Сейчас самые лучшие покрытия проницаемы для диффузии кислорода к поверхности металла. Коррозия развивается в перегруженных зонах, когда начинает отслаиваться покрытие. Разрушение начинается в микроскопических трещинах или раковинах, появляющихся от

нагрузок и напряжений. Именно здесь нанотехнологии могут прийти на помощь. Ученые работают над покрытиями, которые делают возможным самозалечивание корродирующей металлической поверхности. Активное окисление дефектных мест понуждает наночастицы высвобождать ионы, подавляющие коррозию. Когда дефект залечен, покрытие прекращает высвобождение ионов до следующей «атаки».

На основании исследования новых материалов сделан вывод о перспективности фуллеренов C_{60} для решения различных триботехнических задач, в частности перспективности применения фуллеренов для образования триботехнических и трибохимических защитных пленок на деталях механизмов, внутренних поверхностях трубопроводов и технологических емкостей и антикоррозионной защиты [110].

Кроме того, основаниями для такого вывода могут служить сведения общего характера о свойствах молекул C_{60} , а именно, их высокой упругости и прочности, низкой поверхностной энергии, высокой химической стабильности, слабых межмолекулярных взаимодействиях, а также квазисферической форме. Различные модифицированные фуллерены могут использоваться в качестве антикоррозионных покрытий.

Из этого следует, что для улучшения физико-механических характеристик можно или резко уменьшать число атомарных дефектов в решетке, приближаясь к идеальному кристаллу (монокристаллы, усы, нанотрубки), или, напротив, увеличивать их число, стремясь к нанокристаллическому или аморфному состоянию материала.

В настоящее время внимание материаловедов всего мира привлекают методы повышения эксплуатационных, в том числе, антикоррозионных характеристик материалов, путем применения разных наноструктур углерода. Нанотрубки – это особая форма углерода; имеют диаметр от 1 до 100 нм, а их длина может достигать 100 мкм и более. Углеродные нанотрубки могут быть однослойными и многослойными; обладают химической и термической стабильностью в диапазоне температур до 1730°C ; высокими показателями

теплопроводности, прочности и др. [110].

Уникальные физико-механические свойства нанотрубок не представляют большой ценности, пока они не будут введены в матрицу. Композиционные материалы, содержащие углерод (например, углеродные волокна), широко применяются в различных областях техники. В таких материалах в качестве матрицы используется пластик, смола или металл. При введении углеродных волокон в матрицу возрастают жесткость, упругость, прочность. Материал становится менее склонен к образованию трещин.

Нанесение на поверхности металлов покрытий из материалов, содержащих нанотрубки, можно рассматривать как один из перспективных путей снижения коррозии металлов в XXI веке.

5. Электрохимический (катодный и протекторный) метод. Антикоррозионная обработка возможна лишь частично на конструкциях, поддающихся демонтажу (решетки, затворы), и совершенно неосуществима на ряде закладных частей. На таких конструкциях следует рекомендовать комплексную защиту покрытиями совместно с электрохимической защитой, которая применима на подводных поверхностях закладных частей, затворах водосливной плотины, решетках сороудерживающих сооружений, быстропадающих затворах и других элементах.

Электрохимическая защита имеет несомненное преимущество перед лакокрасочными покрытиями в подводной зоне, так как может применяться без предварительной очистки и окраски оборудования, что сильно облегчает монтаж конструктивных элементов защиты и значительно снижает эксплуатационные затраты. Сущность электрохимической защиты заключается в создании на защищаемой поверхности такой катодной плотности тока, при которой потенциалы всех катодных участков доводятся до потенциалов анодов, вследствие чего коррозионные процессы на поверхности металла затормаживаются. Электрохимическая защита эффективна независимо от причин, вызывающих коррозию. Она позволяет прекратить как местную, так и общую коррозию покрытого и непокрытого металла, вызванную образованием

анодов в местах повреждения покрытий, в трещинах пленки, окалины, вблизи мест расселения колоний бактерий и обрастания. Механизм действия электрохимической защиты на коррозионный процесс одинаков при различных условиях его возникновения. Различия заключаются лишь в интенсивности протекающих электрохимических процессов и соответственно в величинах плотностей токов и потенциалов, необходимых для защиты.

В принципе электрохимический способ защиты состоит в том, что к погруженной в электролит стальной конструкции присоединяется другой («жертвенный») металл, с более низким потенциалом. Возникает гальваническая пара, где стальная конструкция превращается в катод, а присоединенный металл в анод. При этом разрушается присоединенный металл, а стальная конструкция остается защищенной. В гальванической паре присоединенным металлом (протектором) обычно являются сплавы магния или алюминия, которые дают достаточную разницу между потенциалами протектора и защищаемого объекта и обладают другими необходимыми качествами. Способ защиты, при котором защитный ток вырабатывается гальваническим путем, называется протекторной защитой.

Анодное окисление металла можно приостановить, если тем или иным способом искусственно создать поток электронов в направлении, обратном коррозионному току. Тогда электроны, получаемые защищаемым металлом извне, сместят равновесие справа налево, что создает препятствие к переходу катионов металла в раствор. На аноде коррозионного элемента возникает избыток электронов, и он в результате этого превращается в катод (по отношению к электролиту) искусственно созданного поляризационного элемента. Здесь происходит катодная поляризация, благодаря которой коррозия защищаемого металла приостанавливается. Рассмотренный способ борьбы с коррозией и носит название катодной (электронной) защиты металлов [9].

Катодная защита обладает целым рядом важных преимуществ, к числу которым относятся: надежность и долговечность защиты, возможность осуществления защиты любой конструкции, невысокая стоимость устройства

катодной защиты и небольшие эксплуатационные расходы и т.д. [111].

Задача определения параметров катодной защиты формулируется следующим образом: найти схему размещения анодов, их количество, токовую производительность, количество катодных станций, их мощность для обеспечения на защищаемой поверхности защитного потенциала (или защитной плотности тока) в заданных пределах.

Катодная защита металлоконструкций позволит значительно увеличить межремонтные сроки эксплуатации их без дополнительной обработки. При её применении, периодичность капитального ремонта будет определяться сроком службы анодов катодных установок. Осуществление защиты не требует ни предварительной очистки конструкций от продуктов коррозии и старой краски, ни осуществления каких-либо дополнительных работ. Таким образом, защита металлического оборудования гидротехнических сооружений от коррозии может быть осуществлена достаточно эффективно путем применения лакокрасочных покрытий и катодной защиты.

При неправильной эксплуатации катодной установки возможны отрицательные результаты, которые вместо защиты стальных конструкций ускоряют их коррозию. То есть либо на разрушенных от коррозии участках металлических конструкций гидротехнических сооружений выделяется молекулярный водород, который ухудшает адгезию защитных лакокрасочных и др. покрытий, либо во втором случае металл оказывается недозащищенным от коррозии. Также возможно, что неправильная работа катодной установки приведет к адсорбции водорода, который в свою очередь приводит стальные конструкции к водородному охрупчиванию.

По нашему мнению, катодная защита металла от коррозии под напряжением в водных средах может быть достаточно эффективной при соблюдении оптимальных режимов её использования. Эти режимы определяют экспериментально для каждого отдельного случая эксплуатации металлических конструкций гидротехнических сооружений.

Кроме коррозии под напряжением в водной среде, металлические

конструкции гидротехнических сооружений подвергаются биохимической коррозии. Защита металлов от биохимической коррозии в основном состоит в предотвращении, ограничении развития или уничтожении микроорганизмов. Это достигается [112]: повышением общей коррозионной стойкости металлов и покрытий; применением лакокрасочных покрытий и полимерных материалов, обладающих биоцидными свойствами или включающих биоциды; нанесением на поверхность конструкций смесей, включающих гидрофобизирующие, ингибирующие вещества и биоциды; поддержанием определенных условий эксплуатации (относительная влажность воздуха не более 80 %, температура не выше 20°C, воздухообмен, очистка воздуха и поверхностей конструкций от механических загрязнений); вводом в водные среды эффективных добавок бактерицидов; применением катодной и протекторной защиты для подземных сооружений, гидросооружений и плавучих средств; применением средств консервации, содержащих ингибиторы коррозии, в том числе летучие.

Учитывая все способы защиты от коррозии и для обоснованного назначения мероприятий по защите от коррозии металлоконструкций на стадии проектирования и строительства гидротехнических сооружений необходимо и достаточно достоверное прогнозирование коррозионных повреждений. Такое прогнозирование может быть осуществлено на основе изучения или анализа выполненных исследований коррозии стали в пресных природных водах различного химического состава. После изучения и анализа вопроса требуется выбрать экономически эффективный и оптимальный комплекс мероприятий по защите от коррозии металлических конструкций, в который могут входить и защитные покрытия, и электрохимическая защита и другие способы защиты. Выполнение комплексной защиты от коррозии является гарантом надежной и долговечной эксплуатации металлических конструкций гидротехнических сооружений.

4.2 Определение коэффициента долговечности в зависимости от коррозии металлических конструкций ГТС

Для экспериментального определения коэффициента долговечности, принимающегося в зависимости от коррозии металлических конструкций гидротехнических сооружений, было обследовано подвергание коррозии металлических конструкций Ассинского гидроузла в Жамбылской области.

По сведениям начальника эксплуатационного участка за последние 30 лет на гидроузле не проводились ремонтные работы, а противокоррозионная защита с начала эксплуатации 1966 года вообще не проводилась. Металлические конструкции на гидроузле в плачевном состоянии. Имеются коррозионные поражения в виде язв, трещин глубиной до 3-5 мм, наростов, обрастаний. Также имеются деформации - прогибы, смещения, отрывы канатов и тонких элементов затворов, трещины основного металла и сварочных соединений. Особенно коррозии подвержены подводные части обшивок и элементов затворов, нижние части ног порталов, шлюзовые затворы. Из-за отсутствия или износа донных и боковых уплотнений имеются значительные истирающие наносами и коррозионные повреждения боковых и донных участков всех затворов гидроузла (рис. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4).



Рис. 4.1. Коррозионные повреждения сегментного затвора и ремонтных шандоров



Рис. 4.2. Коррозионные повреждения элементов сегментного затвора



Рис. 4.3. Коррозионные повреждения шлюзовых затворов



Рис. 4.4. Коррозионные повреждения затворов канала для подачи воды на завод минеральных удобрений и ПМК

Как видно из рисунков, все металлические конструкции гидроузла имеют корродированные поверхности. На коррозию металлов гидроузла влияют минеральные соли, вещества и химические соединения, количество растворенных газов в реке, воздействие железобактерии и микроорганизмов, а также речные наносы, которые истирают поверхности, способствуя этим развитию коррозии.

Исследование процесса развития коррозии, определение его основных параметров (глубина, скорость коррозии и т.д.), предотвращение и защита от коррозии, выполнение требуемых мероприятий по ремонтно-восстановительным работам является гарантией надежной и долговечной эксплуатации металлических конструкций гидротехнических сооружений. Учитывая это, было проведено обследование по определению скорости коррозии $V_{С.Кор.}$ металлических конструкций на Ассинском гидроузле и были проведены расчеты по определению коэффициента долговечности $\gamma_{долг.}$, который принимается в зависимости от коррозии металлических конструкций гидротехнических сооружений.

Для этого были произведены замеры толщины стенок основных элементов металлических конструкций гидроузла с помощью штангенциркуля и сконструированным измерителем толщины стенок. Он состоит из рамы, которая раскрывается и закрывается, на конце рамы установлен индикатор часового типа и конус при зажиме обеих концов рамы. Им можно определить измеряемую толщину с точностью 0,01 мм. Проектная и замеренная толщина стенок металлических конструкций на Ассинском гидроузле показаны в таблице 4.2.

Используя замеренную толщину, проводим следующие расчеты. По формуле определяем средние потери толщины стенок элементов от коррозии всех металлических конструкций

$$\Delta_{cp} = \frac{\sum \Delta}{n}, \quad (4.1)$$

где $\Sigma\Delta$ - сумма средних потерь толщины стенок элементов от коррозии;

n - число замеренных элементов.

Таблица 4.2 - Проектная и замеренная толщина стенок металлических конструкций, мм

Замеренные конструкции и элементы		Верхняя часть обшивки	Нижняя часть обшивки	Нижние элементы портала	Донные элементы затвора	Боковые поверхности затвора
Сегментный затвор	про.	10	10	9	12	10
	зам.	9,8	7	8,5	9	9,5
Шандорные затворы (атм.кор)	про.	12	12	-	-	12
	зам.	11,9	11,9	-	-	11,9
Шлюзовой затвор на шугасбросе	про.	4,5	4,5	-	-	4,5
	зам.	4,3	4,3	-	-	4,3
Затвор на канале подачи воды заводу	про.	5	5	-	-	5
	зам.	4,9	4,5	-	-	4,9
Металлическая поверхность, которая находится под водой в канале	про.	4,5	4,5	-	-	4,5
	зам.	4,4	4,4	-	-	4,4

Следующей формулой рассчитываем средние потери толщины стенок элементов от коррозии

$$\Delta = t_{\text{проект}} - t_{\text{зам}}, \text{ мм} \quad (4.2)$$

По результатам расчетов были определены следующие средние данные для всех металлических конструкции гидроузла: $\Sigma\Delta = 9,1$, $n = 17$, $\Delta_{\text{ср}} = 0,5353 \text{ мм}$. Из полученных данных видно, что после более 45-летней эксплуатации металлических конструкций Ассинского гидроузла толщина стенок в среднем уменьшилась примерно на 0,5 мм от проектной толщины.

Отсюда можно определить условную среднюю скорость коррозии металлических конструкций за все время эксплуатации данного гидроузла

$$V_{C.Кор.ср} = \frac{\Delta_{CP}}{\tau_{ЭКС}}, \quad (4.3)$$

где $\tau_{ЭКС}$ - время с ввода в эксплуатацию гидроузла до 2014 года, $\tau_{ЭКС} = 48$ года.

$$V_{C.Кор.ср} = \frac{0,5353}{48} = 0,01115 \text{ мм/год}$$

Если учесть что, средний срок службы металлических конструкций гидротехнических сооружений в соответствии с [1] равняется $\tau_{C.C.} = 80$ годам, то средние потери толщины от коррозии к концу срока службы будут равны

$$t_{c.c.} = V_{C.Кор.ср} \cdot \tau_{C.C.}, \quad (4.4)$$

$$t_{c.c.} = 0,01115 \cdot 80 = 0,9 \approx 1 \text{ мм.}$$

По результатам видно, что после 80 лет эксплуатации металлических конструкций Ассинского гидроузла средние потери толщины всех элементов от коррозии к концу срока службы будут равны примерно 1 мм от проектной толщины. Так, как это величина в среднем составляет 10 % от проектной толщины всех элементов коэффициент долговечности можно принять равным $\gamma_{долг.} = 1,1$.

Найденный коэффициент является обобщенным коэффициентом долговечности, принимаемым от коррозии замеренных поверхностей металлических конструкций данного гидроузла. Если рассматривать по отдельности для каждой конструкции, то эта величина будет равняться: для

сегментных затворов - $\gamma_{\text{долг.}} = 1,027$; для шандорных затворов - $\gamma_{\text{долг.}} = 1,0002$; для шлюзового затвора на шугасбросе - $\gamma_{\text{долг.}} = 1,00017$; для затвора на канале подачи воды заводу - $\gamma_{\text{долг.}} = 1,00021$.

Эти коэффициенты используются при расчете коэффициентов надежности $\gamma_{\text{над.}}$ и надежности по материалам $\gamma_{\text{над.м.}}$, которые используются для расчета металлических конструкций гидротехнических сооружений на статическую прочность при действиях только нормальных или только касательных напряжений по известным [34] формулам. Сам коэффициент надежности $\gamma_{\text{над.}}$ состоит из нескольких коэффициентов:

$$\gamma_{\text{над.}} = \gamma_{\text{долг.}} \cdot \gamma_{\text{рем.}} \cdot \gamma_{\text{б.от.}} \cdot \gamma_{\text{сох.}}, \quad (4.5)$$

где $\gamma_{\text{рем.}}$ - коэффициент, учитывающий ремонтпригодность конструкций;

$\gamma_{\text{б.от.}}$ - коэффициент, учитывающий безотказность конструкций;

$\gamma_{\text{сох.}}$ - коэффициент, учитывающий сохраняемость конструкций.

Рассчитанный коэффициент долговечности может использоваться при проектировании металлических конструкций гидротехнических сооружений, с учетом, того что конструкция имеет определенную защиту от коррозии и что, там происходит исключительно равномерная коррозия. Его можно использовать в сравнительно новых, проектируемых и строящихся гидросооружениях, так как, во всех этих сооружениях воздействия коррозии учтены, имеется комплекс защиты от нее, и предполагается, что там коррозия имеет равномерный характер.

Если коррозия конструкции имеет локальный характер, то есть имеет коррозионные язвы, трещины и другие локальные повреждения, то требуется выполнять дополнительные специальные расчеты, учитывающие площадь коррозионного повреждения и основные факторы коррозии.

4.3 Состояние надежности металлических конструкций Ассинского гидроузла

Нами проведено обследование гидроузла [113, 114], расположенного на р. Асса в месте выхода реки из скального каньона на конус выноса, 10 км южнее г.Тараз в Жамбылском районе Жамбылской области.

Назначение гидроузла комплексное и используется для целей ирригации и круглогодичного промводоснабжения ТОО «Казфосфат» количестве до $2,5\text{м}^3/\text{сек}$.

Для этих же целей на реке Терс, одной из составляющих р. Ассы, построено Терс-Ащыбулакское водохранилище с емкостью 160 млн. м^3 , что позволяет регулировать свободный сток и в вегетационный период осуществлять пропуски воды в необходимом объеме.

Водозабор для систем этих бассейнов рек Асса и Талас осуществляется из Ассинского гидроузла, перераспределение воды между бассейнами рек Асса и Талас несколько ниже по каналу ПК 27÷23. Согласно требованиям, забираемая вода из р. Ассы для промводоснабжения не должна превышать содержание наносов более 200 мг/литр.

Конструкция Ассинского гидроузла выполнена согласно рекомендации ГрузНИИГиМа с расположением первой наносо-перехватывающей галереи, несколько выше водоприемного отверстия ПМК.

Класс капитальности Ассинского узла – II.

Водозаборный узел на р. Ассе состоит из головных сооружений в составе:

- 1) плотины с водоприемником каналов и водоводов, помещением и оборудованием для обогрева затворов;
- 2) головного участка водовода по ПК 0÷68;
- 3) головного участка Ассинского ПМК от плотины до мота на пикете 30÷50;
- 4) головного участка канала Чумой (подводящий канал к отстойнику) от пикета ПК 10 ПМК до водовыпуска в канал полива лесонасаждений у отстойника;
- 5) водовыпусков на ПК 10 ПМК в канал Садовой и подводящий канал к отстойнику;

- б) водовыпуска в канал Чумой из Подводящего канала;
- 7) вододелителя на ПК 27÷23;
- 8) автодороги с лесонасаждениями и сооружениями для их полива от плотины до вододелителя;
- 9) служебных помещений.

Водоподъемная плотина щитового типа с наносоперехватывающими галереями конструкции ГрузНИИГиМ расположена в месте выхода реки из скального каньона на конус выноса. Плотина имеет 5 пролетов по 8 м, перекрываемых стальными сегментными затворами 8х4 м. Пролеты разделены бетонными быками шириной 2 м. Понурная часть выполнена из железобетона, а водосливная и водобойная, заканчивающаяся зубом глубиной 5 м – из бетона. Котлован за зубом заполнен наброской из крупного камня. Водосливная и водобойная части защищены от истирания наносами гранитной облицовкой.

Маневрирование затворами осуществляется электролебедками грузоподъемностью 2х5 тс, установленными на служебном мостике сборно – монолитной конструкции.

Для работы плотины в зимних условиях предусмотрен электрообогрев закладных частей и затворов плотины, который не работал с начала эксплуатации гидроузла.

Для бесперебойного гарантированного снабжения водой каналов и водовода и минимального попадания наносов в водоподъемники за сооружениями и каналами эксплуатационного участка устанавливается постоянный надзор. Все отклонения от нормальной работы и состояния сооружений и каналов эксплуатационного участка заносятся в специальный журнал и принимаются меры по немедленному их устранению.

Надзор за затворами и подъемными механизмами эксплуатационного участка проводится:

- а) наблюдением за состоянием обшивки, боковых и донных уплотнений затворов;
- б) наблюдением за величиной зазора между щитами и пазом и удалением

- оттуда мусора ;
- в) своевременным удалением с затворов плавника;
 - г) околкой льда и очисткой от снега затворов в зимнее время;
 - д) наблюдением за степенью коррозионных повреждений металлических конструкций;
 - е) своевременной покраской затворов, закладных частей и подъемных механизмов;
 - ж) удалением пыли, старой затвердевшей смазки с заменой на новую;
 - з) наблюдением за состоянием соединительных и крепежных болтов, гаек и тяговых тросов;
 - и) наблюдением за сохранностью всего гидромеханического и электромеханического оборудования.

Все дефекты, обнаруженные в порядке повседневного надзора, заносятся в специальный журнал и должны доводиться до вышестоящих организаций.

Для обследования металлических конструкций и механического оборудования гидротехнических сооружений необходимо иметь информацию:

- а) об их конструктивных решениях;
- б) об их возможных напряженных состояниях;
- в) о надежности;
- г) о коррозионных состояниях металлических конструкций.

Помимо текущего надзора участок два раза в год подвергается обследованию, которому предшествуют производственные съемки, уточняющие состояние сооружений, русла, их дефекты, необходимость в проведении ремонтных работ и способы производства работ.

По данным начальника эксплуатационного участка в течение последних двадцати пяти лет никакие ремонтные работы не проведены, и обнаружены следующие отклонения и дефекты:

- За период эксплуатации пришли в непригодность все боковые и донные уплотнения гидротехнических затворов (рис. 4.5).

- Имеются недопустимые коррозионные повреждения стальных поверхностей и элементов, где глубина язв достигают 3...5 мм.
- Верхние пояса ног порталов I, IV, V сегментных затворов имеют пластические деформации и трещины (V) в результате подъема сегментного затвора, очевидно, в зимнее время (рис. 4.6, 4.7).
- Не работает подъемный механизм IV сегментного затвора из-за непригодности двигателя редуктора электролебедки.
- Сорваны тросы электролебедки V сегментного затвора, и они прикреплены непосредственно к верхним поясам ног порталов (рис. 4.8).
- Деформирована обшивка и оторван сварочный стык правой опорной балки II сегментного затвора, вероятно из-за сильного удара ледостава или плавающего бревна в зимнее время (рис. 4.9).
- Имеются искривления и деформации элементов винтовых подъемников донников ПМК.

В результате обследования установлено, что все сегментные затворы сохранили свою ремонтпригодность, что доказывает их высокую надежность.

Для безопасной эксплуатации Ассинского гидроузла требуется выполнить следующие ремонтные работы:

- а) заменить все резиновые прокладки;
- б) очистить нижний бьеф от заиления;



Рис. 4.5. Отсутствие боковых уплотнений сегментного затвора

- в) заменить подверженные части верхнего пояса ноги порталов I, IV, V сегментных затворов, для чего необходимо отрезать деформированные части по всей деформированной длине и заменить такими же отрезками швеллеров;
- г) заменить двигатель редуктора электролебедки IV сегментного затвора.
- д) правильно прикрепить тросы электролебедки к сегментному затвору V сегментного затвора.



Рис. 4.6. Деформированные части верхних поясов ног порталов V сегментного затвора



Рис. 4.7. Трещины на верхней части поясов ног порталов V сегментного затвора



Рис. 4.8. Сорванные тросы V сегментного затвора



Рис. 4.9. Деформированная обшивка и оторванный сварочный стык правой опорной балки II сегментного затвора

На основании визуального обследования других водохозяйственных объектов Жамбылской области, учитывая их важность для народного хозяйства

Республики Казахстан, необходимо принимать меры по выделению необходимых средств для текущего и капитального ремонта водохозяйственных объектов.

4.4 Состояние надежности металлических конструкций Кызылординского гидроузла

«Кызылординский гидроузел» начал строиться с 1946 года, но основные работы на нем развернулись в 1952 году. В июне 1956 года был произведен первый пропуск воды через плотину, а в августе месяце 1957 года гидроузел был сдан в эксплуатацию. Кызылординская плотина (рис. 4.10) является крупным уникальным сооружением, которое впервые построено на плавунных основаниях, перекрывающим русло большой Средне-Азиатской реки Сырдарьи.



Рис. 4.10. Кызылординский гидроузел

Плотина в основном служит для гарантийного обеспечения нормальной регулировки и подачи воды по освоению Левобережного и Правобережного массивов. Пропускная способность самой плотины – $Q = 214,0 \text{ м}^3/\text{с}$, левого и правого регуляторов - $Q=318,0 \text{ м}^3/\text{с}$, порог плотины и донных галерей расположен на отметке – $H = 123,000$. Плотина имеет пять пролетов шириной по

16,0 м каждый, с отводящими магистральными каналами: Левобережный (ЛМК) – с шестью очками при ширине по 5,0 м, с пропускной способностью $Q = 2200,0 \text{ м}^3/\text{с}$ и Правобережный (ПМК) с 3 очками – по 5,0 м каждый, с пропускной способностью $Q=110,0 \text{ м}^3/\text{с}$. Общая ширина плотины с регулятором 152,6 метров. Назначение гидроузла – обеспечить водозабор для существующих оросительных систем Кызылординской области. В настоящее время орошаемая площадь левобережного массива – 89,6 тыс. га, правобережного массива – 8,7 тыс.га.

По проекту гидроузел предназначен для орошения 120 тыс. га и обводнения около 2 млн. пустынных земель на левом и правом берегах р.Сырдарья. Плотина имеет пять пролетов по 16 м каждый, перекрываемых сегментными затворами 16х6 м (рис. 4.11) и аварийно-ремонтными шандорами. Маневрирование сегментными затворами осуществляется однобарабанными двухканатными лебедками с полиспадами г/п 2х30 тс с железобетонной эстакады, а шандорами двухтальферной тележкой г/п 2х10 тс, передвигающейся по монорельсовому пути. С верховой стороны по бычкам шириной 3,5 м проложен автодорожный мост шириной 8,1 м. Отметка НПГ 129,0 м БС, расчетный расход $1200 \text{ м}^3/\text{с}$, а максимальный 1% обеспеченности при горизонте воды в верхнем бьефе 129,37 м БС и в нижнем бьефе 128,86 м БС равен $1900 \text{ м}^3/\text{с}$. Гидроузел имеет Левобережный и Правобережный шлюзы-регуляторы для подачи воды в магистральные каналы.

Левобережный регулятор фронтального типа имеет два яруса, верхний для забора воды в ЛМК, а нижний для отвода наносов и сброса воды в нижний бьеф. Оба яруса имеют по 6 пролетов шириной 5 м каждый, верхний высотой стенок 8,4 м, нижний с высотой отверстий 1,5 м с разделительными бычками шириной 1 м. Гасители энергии в нижнем бьефе промывных галерей аналогичны гасителям основной водоподъемной плотины. Отметка порога галерей равна отметке порога плотины 123,0 м БС. Лоток регулятора шириной 30 м в головной части выполнен криволинейным имеет криволинейные разделительные струенаправляющие стенки. Сопрягается с дном канала

водоскатом длиной 10 м с перепадом 1,5 м водобойной плитой длиной 25 м. В концевых частях водоската и водобойной плиты имеются два ряда железобетонных зубьев Ребока. Отверстия регулятора и донных галерей перекрываются плоскими колесными затворами 5x4,2м и 5x1,8м соответственно с электрифицированными винтовыми подъемниками г/п 2x10 тс. Для ремонтных работ предусмотрены шандорные пазы с комплектом ремонтных щитов. Расходный расход левобережного регулятора равен 208 м³/с.



Рис. 4.11. Сегментный затвор Кызылординского гидроузла

Правобережный регулятор запроектирован и построен по аналогии с левобережным. Регулятор и промывные галерей имеют по 3 отверстия шириной 5 м каждое. Отметка порога регулятора 125,2 м БС, промывных галерей 123,0 м БС. Лоток сопрягается с дном канала водоскатом длиной 15 м с перепадом 0,8м зубьями Ребока. Гидромеханическое оборудование аналогично левобережному регулятору. Расчетный расход 110 м³/с.

Основными задачами службы эксплуатации водозаборного гидроузла являются: обеспечение бесперебойной водоподдачи согласно утвержденному графику, обеспечение заданной степени очистки воды от наносов, безаварийный пропуск паводка, шуги и плавника, содержание в исправности всех сооружений и устройств гидроузла и охрана их путем систематического

надзора и ухода за сооружениями, пропуск паводков, своевременное выполнение всех видов ремонта, постоянный контроль и учет воды в верхнем и нижнем бьефах гидроузла на пропускаемых через сооружения расходов воды, которые определяют по графикам пропускной способности для различных отверстий и кривым $Q=f(H)$, прошедшим метрологическую аттестацию для русел реки и каналов.

До 1986 года гидротехнические затворы в Кызылординском гидроузле имели плоские очертания. Плоские затворы открывались с помощью козловых кранов грузоподъемностью 100 тс. Из-за того, что колеса затвора вышли из строя, затворы имели коррозионные повреждения, и козловые краны морально устарели, а также на плоские затворы зимнее время действовали горизонтальные силы при ледоставе, которые по величине имели ощутимые значения. Все перечисленные факторы снизили надежность существующих плоских поверхностных затворов. Местные специалисты в 1986 году предложили новые конструктивные решения, и заменили плоские затворы на более удобные в эксплуатации сегментные затворы [115].

Предложения для улучшения состояния «Кызылординского гидроузла» по эксплуатации [108, 114]:

- обследовать фактическое состояние гидроузла на прочность металлоконструкций, бетона и других несущих нагрузки конструкции. Ранее 1986 году эта работа была проведена Среднеазиатским научно-исследовательским институтом ирригации (САНИИРИ);
- обследовать нижний бьеф плотины;
- произвести ремонт подводящего и отводящего русла реки (верхний и нижний бьефы);
- необходимо произвести облицовку бычков (ВБ) металлическими листами;
- устройство лифта для подъема на эстакаду (винтовая лестница) левобережный шлюз-регулятор (существующую вертикальную необходимо заменить для безопасности);
- устройство центрального диспетчерского пункта управления затворами всего

гидроузла в одном здании на прилегающей территории;

- необходимо общее архитектурное оформление территории гидроузла с ликвидацией стелы и других устаревших малых архитектурных форм;
- замена щитов на ЛМК - 1 шт.;
- замена распределителей на ЛМК - 6 комплектов;
- замена винтовых подъемников донных галерей на ЛМК - 6 шт. (рис. 4.12);
- подключение электрообогрева щитов на ЛМК;
- устройство рыбозащитного устройства;
- на гидропостах верхнем и нижнем бьефах плотины требуется установить приборы измерения расхода воды, утепление и освещение. В настоящее время существующие гидропосты не позволяют нормально вести учет воды. Особенно в зимних условиях не решены вопросы автоматизации водоучета, не предусмотрена тарифовка гидротехнических сооружений для канала ЛМК и ПМК, сооружения «Айтек», головной сооружение канала «Айтек», Соркол, Елтай; необходимо построить гидромостик (для измерения расходов воды). Пропускная способность ЛМК по проекту -208,0 м³/сек, а фактический расход доведен 2006 году до 227,0 м³/сек, это приводило к разрушению бетонных стен, а также дамбы канала;
- произвести ремонтно-восстановительные работы на стенах и лестничных клетках плотины нижнего бьефа на левом берегу.
- установка указателей положения основных сегментных затворов-5 штук;
- установка указателей положения донных и основных щитов- 6 штук.

На нижнем бьефе ЛМК требуется:

- ремонт свищей (отверстий) в наносоперехватывающих галереях;
- ремонт служебного мостика (пол несущий) с заменой перильного ограждения и установкой стоек (малые архитектурные формы);
- ремонт струенаправляющей стенки, заделка трещин, оголенных частей или укрепление покрытием полимербетоном на высоту до 2-х метров от воздействия температуры;
- облицовка устоев водовыпуска;

- восстановление крепления на разрушенных участках монолитным железобетоном с обеих сторон. Замена разрушенных участков с креплением сборными железобетонными плитами на крепление монолитным железобетоном;
- укрепление дна водобоя и рисбермой;
- устройство зуба из камня;
- во избежание ЧП – ликвидировать старый автодорожный мост в НБ.



Рис. 4.12. Неудовлетворительное состояние винтовых подъемников донных галерей на ЛМК

Выводы по главе

1. Повышение надежности металлических конструкций гидротехнических сооружений, можно осуществить с помощью комплекса мероприятий, который включает: современное качественное проектирование, правильную эксплуатацию и контроль надежности металлических конструкций, избежание появления реоменных структур на металлических поверхностях, отделение металла от агрессивной среды антикоррозионным покрытием, электрохимический метод защиты от коррозии.
2. С учетом механизма развития коррозии под напряжением, предложен способ

нанесения защитных покрытий, основанный на нанесении слоя антикоррозионного покрытия на поверхность металлической конструкций в заводских условиях с его предварительным напряжением и приложением нагрузки.

3. Экспериментально определены коэффициенты долговечности, принимающиеся в зависимости от характера коррозии металлических конструкций гидротехнических сооружений, на примере обследования Ассинского гидроузла в Жамбылской области. Эти коэффициенты используются при расчете коэффициентов надежности $\gamma_{\text{над}}$ и надежности по материалам $\gamma_{\text{над.м.}}$, которые используются для расчета металлических конструкций гидротехнических сооружений по предельным состояниям.

4. В результате обследования установлено, что все сегментные затворы Ассинского и Кызылординского гидроузлов сохранили свою ремонтпригодность, что доказывает их высокую надежность. Для надежной и долговечной эксплуатации этих гидроузлов требуется выполнить комплекс ремонтных мероприятий.

5. На основании проделанного обследования водохозяйственных объектов, учитывая их важность для народного хозяйства Республики Казахстан, необходимо предпринять меры по выделению необходимых средств для контроля за состоянием, текущего и капитального ремонта водохозяйственных объектов.

ВЫВОДЫ

Диссертационная работа посвящена определению путей повышения надежности и долговечности элементов металлических конструкций гидротехнических сооружений, работающих под напряжением в водной среде, на основе исследования магнитных свойств ферромагнитных изделий, которыми являются эти конструкции. В результате проведенных исследований сформулированы следующие основные **выводы**:

1 Сделанный анализ показывает, что для обеспечения безопасности металлических конструкций гидротехнических сооружений необходим контроль надежности и долговечности этих сооружений. Контроль надежности и долговечности осуществляется с помощью современных методов измерения деформаций и напряжений в элементах металлических конструкций гидротехнических сооружений.

2 Применение тензометрического, атопологического или электромагнитного методов измерения деформаций и напряжений в элементах металлических конструкций гидротехнических сооружений могут показать хорошие результаты. Однако атопологический метод для оценки напряженного состояния усиленных металлических конструкций гидротехнических сооружений более удобен, чем тензорезисторный способ. Тем не менее, электромагнитный метод для оценки напряженного состояния усиленных конструкций гидротехнических сооружений имеет неоспоримое преимущество перед другими методами и способами. Результаты эксперимента с помощью электромагнитного метода показали, что напряжение в усиленной балке было равно 40,75 мПа, теоретическое значение - 41,8 мПа, относительная погрешность составляет – 2,51 %. Таким образом, полученное значение напряжений в усиленных элементах металлических конструкций показывает высокую точность измерительной системы.

Фактический годовой экономический эффект от мероприятий по измерению напряжений в металлических конструкциях составил 650 тыс. тенге (Акт внедрения).

3 Во всех проведенных исследованиях по коррозии не учтен тот факт, что металлические конструкции являются ферромагнитными изделиями, в которых в нормальных условиях существуют доменные структуры. На коррозию металлических конструкций влияют магнитные свойства металлов.

4 Развитие коррозии в растянутых и в сжатых элементах металлических конструкций зависят от напряженного состояния, при напряжениях до предела упругости процесс зависит от числа доменов повернутых по направлению действующих напряжений. Развитие коррозии в изгибаемых элементах металлических конструкций начинается и превалирует в средней части их растянутой зоны, где в основном концентрируется зона появления силы Лоренца. Скорость развития коррозии вокруг технологического оборудования, имеющие электропроводные многожильные обмотки, выше, чем на других участках элементов металлических конструкций. В криволинейных участках стальных труб внутренняя коррозия развивается 2,67 раза быстрее, чем в прямолинейных участках.

5 Экспериментально определены коэффициенты долговечности $\gamma_{\text{долг.}} = 1,1$, принимающиеся в зависимости от характера коррозии металлических конструкций гидротехнических сооружений, на примере обследования Ассинского гидроузла в Жамбылской области. Эти коэффициенты используются при расчете коэффициентов надежности $\gamma_{\text{над.}}$ и надежности по материалам $\gamma_{\text{над.м.}}$, которые используются для расчета металлических конструкций гидротехнических сооружений по предельным состояниям.

6 С учетом установленного механизма развития коррозии под напряжением, предложен способ нанесения защитных покрытий, основанный на нанесении слоя антикоррозионного покрытия на поверхность металлической конструкции в заводских условиях с его предварительным напряжением и приложением нагрузки.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Результаты проведенных научных исследований рекомендуется использовать водохозяйственными организациями при проектировании, строительстве, реконструкции и эксплуатации металлических конструкций гидротехнических сооружений, а также в высшей школе при подготовке инженеров-гидротехников, строителей.

Основные результаты исследований реализованы ГКП «Аса-Талас» и в хозяйствах подведомственных Жамбылского филиала ТОО «Казфосфат», которые подтверждены актами внедрения.

С целью проверки эффективности принятых конструктивных решений по усилению элементов металлических конструкций гидротехнических сооружений, были получены инновационные патенты Республики Казахстан - Атопологический способ измерения напряжений в элементах изделий [38] и Электромагнитный способ измерения напряжений в ферромагнитных изделиях [61].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Мирцхулава Ц.К.** Надежность гидромелиоративных сооружений [Текст] / Мирцхулава Ц.К. – М.: Колос, 1974. - 280 с.
- 2 **Мирцхулава Ц.Е.** Указания по определению допускаемых (неразмывающих) скоростей водного потока для связных грунтов и облицовок [Текст] / Мирцхулава Ц.К. – М.: Управление водного хозяйства МСХ СССР, 1962.-34 с.
- 3 ГОСТ 27.002-83. Надежность в технике. Термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 18 с.
- 4 **Фрейшист А.Р.** Повышение надежности механического оборудования и стальных конструкций гидротехнических сооружений [Текст] / Фрейшист А.Р., Мартенсон И.В., Розина И.Д. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 232 с.
- 5 **Лащенко М.Н.** Аварии металлических конструкций зданий и сооружений [Текст] / Лащенко М.Н. - Л.: Издательство литературы по строительству, 1969. - 190 с.
- 6 **Шагин Л.А.** Реконструкция зданий и сооружений [Текст] / [Шагин Л.А., Бондаренко Ю.В. и др.]. - М.: Высшая школа, 1991. - С. 24.
- 7 **Хевиленд Р.** Инженерная надежность и расчет на долговечность [Текст] / Хевиленд Р.- М.-Л.: Энергия, 1966. - С. 55.
- 8 **Гнеденко Б.В.** Математические методы в теории надежности [Текст] / Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. - М.: Наука, 1965. - С. 93.
- 9 **Кульман А.Г.** Общая химия [Текст] / Кульман А.Г. - М.: Колос, 1979. - С. 376-389.
- 10 **Лащенко М.Н.** Повышение надежности металлических конструкций зданий и сооружений при реконструкциях [Текст] / Лащенко М.Н.- Л.: Стройиздат, 1987. - С. 113-116.
- 11 **Вольберг Ю.Л.** Долговечность металлических конструкций промзданий в агрессивных средах [Текст]: тез. докл. / Всесоюзный НТС «Повышение эффективности эксплуатации и реконструкции промзданий металлургической,

машиностроительной и горнорудной промышленности». - Макеевка, 1981. - С. 120.

12 **Годжиашвили У.И.** Эффективная антикоррозионная и гидроизоляционная защита шинных шахт здания Ингурской ГЭС [Текст] / [Годжиашвили У.И., Майсурадзе И.И., Чаава М.Н. и др.] // Гидротехническое строительство. - 1990. - №3. - С. 34.

13 **Авакян Л.Г.** Из опыта эксплуатации высоконапорных трубопроводов [Текст] / Авакян Л.Г. // Гидротехническое строительство. - 1955. - №6. - С.17-20.

14 **Кошурников Н.Л.** Разрушение затвора из низколегированной стали [Текст] / Кошурников Н.Л., Комаров В.К. // Гидротехническое строительство. - 1959. - №4. - С.23-27.

15 **Фрейшист А.Р.** Из опыта эксплуатации плоских гидротехнических затворов в зимних условиях [Текст] / Фрейшист А.Р., Розина И.Д., Рахманова А.Л. // Гидротехническое строительство. - 1976. - №4. - С.19-22.

16 **Мартенсон В.Я.** Состояние и перспектива развития гидромеханического оборудования [Текст] / Мартенсон В.Я., Федоров М.Н. // Гидротехническое строительство. - 1977. - №11. - С.25-28.

17 **Мартенсон И.В.** Результаты обследования и опыт эксплуатации механического оборудования гидросооружений [Текст] / Мартенсон И.В. // Гидротехническое строительство. - 1985. - №10. - С.34-37.

18 **Фрейшист А.Р.** Из опыта сооружения и эксплуатации стальных напорных трубопроводов гидроузлов [Текст] / Фрейшист А.Р. // Гидротехническое строительство. - 1987. - №3. - С.12-19.

19 **Любашевский Е.С.** К чему ведет невыполнение СНиПа [Текст] / Любашевский Е.С., Мартенсон В.Я. // Гидротехническое строительство. - 1989. - №10. - С.42-44.

20 **Мартенсон И.В.** Вопросы надежности механического оборудования гидротехнических сооружений [Текст] / Мартенсон И.В. // Гидротехническое строительство. - 1982. - №2. - С.10-11.

- 21 **Холкин И.В.** Двадцатилетний опыт эксплуатации Воткинской ГЭС на р. Каме [Текст] / Холкин И.В., Чекунов А.И. // Гидротехническое строительство. - 1982. - №3. - С.40.
- 22 **Носов Р.П.** Борьба с коррозией металлоконструкций и механического оборудования гидротехнических сооружений [Текст] / Носов Р.П. // Гидротехническое строительство. - 1961. - №5. - С.32-36.
- 23 **Павленко В.В.** Опыт защиты от коррозии металлоконструкций и оборудования на Усть-Каменогорской ГЭС [Текст] / Павленко В.В. // Гидротехническое строительство. - 1966. - №7. - С.7-9.
- 24 **Ханларова А.Г.** Механизм коррозии стали в пресных водах [Текст] / [Ханларова А.Г., Трифель М.С., Гликштейн Е.Д. и др.] // Защита от коррозии гидротехнических сооружений в речных водах: сб. науч. тр. - М.: Энергия, 1968. - С. 55.
- 25 **Чесноков Б.С.** Защита от коррозии лакокрасочными покрытиями механического оборудования речных гидротехнических сооружений [Текст] / [Чесноков Б.С., Литвак М.Л., Гуревич И.М. и др.] // Защита от коррозии гидротехнических сооружений в речных водах: сб. науч. тр. - М.: Энергия, 1968. - С.24-33.
- 26 **Кузнецов В.В.** Коррозии металлоконструкций гидротехнических сооружений в камской воде [Текст] / Кузнецов В.В., Вержбицкая Л.В. // Защита от коррозии гидротехнических сооружений в речных водах: сб. науч. тр. - М.: Энергия, 1968. - С. 24-33.
- 27 **Френкель Г.Я.** Защита внутренней поверхности напорных трубопроводов гидроэлектростанций от коррозии и минеральных отложений [Текст] / Френкель Г.Я. // Энергетическое строительство. - 1970. - №5. - С.54-57.
- 28 **Петров Л.Н.** Коррозия под напряжением [Текст] / Петров Л.Н. - Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1986. - С. 31-34.
- 29 **Воронин Л.А.** Перспективы комплексной реконструкции Волховской ГЭС имени В.И. Ленина и ее эффективность [Текст] / Воронин Л.А. // Гидротехническое строительство. - 1978. - №10. - С.18.

- 30 **Мартенсон В.Я.** Замена двустворчатых ворот при реконструкции судоходных шлюзов [Текст] / Мартенсон В.Я. // Гидротехническое строительство. - 1990. - №8. - С.15-17.
- 31 **Аугустин Я.** Авария стальных конструкций [Текст] / Аугустин Я., Шледзевский Е. - М.: Стройиздат, 1978. - 173 с.
- 32 **Абросимов В.Г.** Оценка уровня напряженности элементов шлюзовых ворот канала имени Москвы [Текст] / [Абросимов В.Г., Бандин О.Л., Гусенков А.П. и др.] // Гидротехническое строительство. - 1982. - №12. - С.43-45.
- 33 **Гавриш В.С.** Исследование напряженно-деформированного состояния шлюзовых ворот на тензометрической модели [Текст] / Гавриш В.С., Простак В.Ф., Химин В.Н. // Гидротехническое строительство. - 1987. - №3. - С.12-19.
- 34 **Алимбаев Б.А.** Методы контроля напряжений в элементах металлических конструкций гидротехнических сооружений [Текст] / Алимбаев Б.А. - Тараз, 2006. – 235 с.
- 35 Инновационный патент РК №20838. Тензорезисторный способ измерения напряжений / Алимбаев Б.А., Манапбаев Б.Ж. Оpubл. 16.02.2009, Бюл. №2.
- 36 **Джанузакова Р.Д.** Экспериментальные исследования атопологического способа измерения напряжений [Текст] / Джанузакова Р.Д. // Вестник КРСУ. - Бишкек, 2013.
- 37 **Бондарович Л.А.** Тензорезисторный метод в испытаниях инженерных конструкций [Текст] / Бондарович Л. А., Шувалов Л. Н., Сафина Л.Х. // Промышленное и гражданское строительство. – Москва, 2008. - №6.
- 38 Инновационный патент РК №23575. Атопологический способ измерения напряжений в элементах изделий / Алимбаев Б.А., Манапбаев Б.Ж., Джанузакова Р.Д. Оpubл. 15.12.2010, Бюл. №12.
- 39 **Филин А.П.** Прикладная механика твердого деформируемого тела [Текст] / Филин А.П. – Москва, 1975. - Т.1. – С.381-390.
- 40 **Дехтяр М.В.** О магнитной диаграмме растяжений и положений точки Виллари на кривой намагничивания [Текст] / Дехтяр М.В. // Изв. АН СССР. Серия Физика. – 1977. - Т.11. - С.33-34.

- 41 **Акулов Н.С.** Влияние упругих напряжений на ход кривой намагничивания [Текст] / Акулов Н.С., Гольфейнбейн А., Бычков Н.А. // ЖЭТФ, 1963. - Т.3. - Вып.1. - С.5-15.
- 42 **Акулов Н.С.** Ферромагнетизм [Текст] / Акулов Н.С. - М.-Л.: Госиздат. технической и теоретической литературы, 1939. - 226 с.
- 43 **Вонсовский С.В.** Современное учение о магнетизме [Текст] / Вонсовский С.В. – М.-Л.: Госиздат. технико-теоретической литературы, 1952. - 550 с.
- 44 **Вонсовский С.В.** Ферромагнетизм [Текст] / Вонсовский С.В., Шур Я.С. – М.-Л.: Госиздат. технико-теоретической литературы, 1948. - 624 с.
- 45 А.С. №461393 СССР. Способ измерения константы магнитной анизотропии / Максимов Е.Д., Мирясов Н.З., Шкинников Н.И. Опубл.14.03.1975.
- 46 **Бикташев Т.Х.** Разработка и исследование электромагнитного метода измерения напряжений [Текст]: автореф. дис.... канд. тех. наук / Бикташев Т.Х. - Свердловск, 1973. - С.6-14.
- 47 **Винтергерст З.** Магнитоупругие свойства стали в применении их к измерению напряжений и вибрации [Текст] / Винтергерст З. // Мировая техника. - 1937. - №10. - С.76-78.
- 48 **Матюкевич Н.К.** Метод исследования анизотропного магнитоупругого эффекта в ферромагнитных изделиях [Текст] / Матюкевич Н.К., Рамейко А.В. // Физические методы и средства неразрушающего контроля. – Минск: Наука и техника, 1976. – С.203-206.
- 49 **Галямин А.И.** Использование токовихревого метода для оценки внутренних напряжений в зоне сварного шва [Текст] / Галямин А.И., Гороздовский Т.Я. // Экспресс-информация / ВНИИГАЗПРОМ. – Москва, 1972. - 21. - С.3-8.
- 50 **Мухиев Т.М.** Разработка электромагнитного метода исследования сдвиговых напряжений [Текст]: автореф. дис.... канд. тех. наук. / Мухиев Т.М. - М., 1970. – С.10-12.
- 51 **Якиревич Я.И.** Разработка, исследование и практическое применение токовихревого метода анализа напряжений в сталях [Текст]: автореф. дис.... канд. тех. наук. / Якиревич Я.И. - Москва, 1968. - С.5-8.

- 52 **Гороздовский Т.Я.** Механико-магнитные гистерезисные процессы при упругом кручении стальных прутков [Текст] / Гороздовский Т.Я., Мухиев Т.М. // Изв. АН КазССР, серия физико-математическая. – Алма-Ата, 1969. – 5. – С.76-80.
- 53 **Щель М.М.** Неразрушающий контроль методом высших гармоник вихревых токов [Текст] / Щель М.М. // сб. науч. тр. – Иркутск, 1970. – Вып.2. – С.97-127.
- 54 **Щель М.М.** Измерение напряжений в шпильках при натяжке аппаратов высокого давления [Текст] / Щель М.М. // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1968. - 3. - С.97-127.
- 55 **Карпов А.В.** Применение магнитошумового метода для контроля напряженного состояния изделий [Текст] / Карпов А.В., Филинов В.В. // Современные физические методы неразрушающего контроля. – М.: МДНТП, 1988. - С.83-87.
- 56 **Karman Gh.** Untersuchungen uver Kuchpotigreit Forschugsaz beaten augdem obbichte dez Indeinwessens. – Berlin. 1910. 81 s.
- 57 **Одинг И.А.** Остаточные напряжения и усталости стали, закаленной т.в.ч. [Текст] / Одинг И.А. // Вестник машиностроения. – 1943. – №4-5. - 23-27 с.
- 58 **Sachs G.** Lunere Spannungen ih Metallenill Metallrunde. 1971. 71. S. 1511.
- 59 **Соболев С.** Накладные и экранные датчики [Текст] / Соболев С., Шкарлет Р.М. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1967. – 236 с.
- 60 **Галямин А.И.** Исследование электромагнитного метода для исследования продольного изгиба стрежней [Текст]: автореф. дис.... канд. тех. наук. / Галямин А.И. - М., 1975. – С.8-21.
- 61 **Инновационный патент РК №21138.** Электромагнитный способ измерения напряжений в ферромагнитных изделиях / Алимбаев Б.А., Малибеков А.К., Манапбаев Б.Ж. Джанузакова Р.Д. Опубл. 15.04.2009. Бюл. №4.
- 62 **Джанузакова Р.Д.** Электромагнитный метод определения напряжений в усиленных элементах металлических конструкций [Текст] / Джанузакова Р.Д. // Вестник КРСУ. - Бишкек, 2013.

- 63 **Кондорский Е.И.** Зонная теория магнетизма [Текст] / Кондорский Е.И. – М.: Издательство Московского университета, 1976. - 170 с.
- 64 **Розинг Б.А.** ЖРФХО (ч.физ). - 1892. –Т. 24. – 105 с.
- 65 **Weis P.** Phys, et radium. 1907. 6. H-661.
- 66 **Френкель Я.И.** Phys. 1928. 49. H-31.
- 67 **Heisenberg W.Z.** Phys. 1928. 49. H-619.
- 68 **Шубин С.П.,** Вонсовский С.В. Proc.Roy.Soc. 1934. A. 145. H-159.
- 69 **Stuart R.,** Marshall W. Phys.Rev. 1960. 120. H-353.
- 70 **Freeman A.J.,** Watson R.A. Phys.Rev. 1961. 124. H-1439.,
- 71 **Williams H.J.,** Sherwood R.S., Foster F.G., Kelly / Journ. Appl. Phys. - 1957. - Vol. 23. - P.1181.
- 72 **Kittel G., Galt J.K.** Solid state Rhys Vol-Newyer. - 1956.
- 73 **Bitter F.** Rhys Rev. 1931. 31. H-1903.
- 74 **Ландау Л.,** Лифшиц Е. Rhys // Zs. USSR. 1935. 8. H-153.
- 75 **Neelj.** Journ. Rhys. Rad 5. 1944.-11/H-241.
- 76 **Смирнов А.А.** Физика металлов. Современное представление о природе металлов [Текст] / Смирнов А.А. - М.: Наука, 1971. - С.80-92.
- 77 **Путилов К.А.** Курс физики. Учение об электричестве [Текст] / Путилов К.А. - М.: Физматгиз, 1963. - Т.2.
- 78 **Бозорт.** Ферромагнетизм [Текст] / Бозорт. - М.: Издательство иностранной литературы, 1956. - С. 487-507.
- 79 **Белов К.П.** Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках [Текст] / Белов К.П. – М.: Госиздат. технико-теоретической литературы, 1957. – 460 с.
- 80 **Акулов Н.С.** Дислокация и пластичность [Текст] / Акулов Н.С. – М.: Издательства АН СССР, 1961. – 124 с.
- 81 **Алимбаев Б.А.** Исследования элетромагнитного метода анализа плосконапряженного состояния в сталях [Текст]: дис. ... канд. тех. наук. / Алимбаев Б.А. - М., 1981.

- 82 **Gook H.K.**, Coutinho A., Peattie K.R. Discussion of paper by Bovw. Carlson and David Pirtz. Development of a device for the direct measurement of compressive stress // Journal of the American Concrete Inst. 1953. 25. N.4.
- 83 **Дзыгало В.М.** Магнитоупругий датчик усилий [Текст] / Дзыгало В.М. // Измерительная техника. – 1965. – С.33-34.
- 84 **Ермолов И.Н.** Методы ультразвуковой дефектоскопии [Текст] / Ермолов И.Н. – М.: Изд. Московского горного института, 1967. - 267 с.
- 85 **Савельев И.В.** Курс общей физики. Электричество [Текст] / Савельев И.В. - М.: Наука, 1970. – Т.2. - 432 с.
- 86 **Williams H.J.**, Sherwood R.S. Journ. Appl. Phys., 28, 548 (1957).
- 87 **Гораздовский Т.Я.** Неразрушающий контроль [Текст] / Гораздовский Т.Я. - М.: Знание, 1977. - 64 с.
- 88 **Улиг Г.Г.** Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику [Текст] / Улиг Г.Г., Ревы Р.У. - Л.: Химия, 1989. - 456 с.
- 89 **Томашов Н.Д.** Теория коррозии и защита металлов [Текст] / Томашов Н.Д. - М.: Изд. АН СССР, 1959. - 592 с.
- 90 **Карпенко Г.В.** Физико-химическая механика конструкционных материалов [Текст] / Карпенко Г.В. - Киев: Наук.думка, 1985. - Т. 1. - 228 с.
- 91 **Эванс Ю.Р.** Коррозия, защита и пассивность металла [Текст] / Эванс Ю.Р. - М.: Металлургиздат, 1941. - 124 с.
- 92 **Алимбаев Б.А.** Особенности развития коррозии в элементах стальных конструкций гидротехнических сооружений [Текст] / Алимбаев Б.А., Манапбаев Б.Ж. // Мат. межд. науч.-практ. конф.: «Проблемы инновационного развития общества: настоящее и будущее». - Алматы: Эверо, 2009. - С. 91.
- 93 **Алимбаев Б.А.** Об одном факторе развития коррозии в элементах металлических конструкций гидротехнических сооружений [Текст] / Алимбаев Б.А., Манапбаев Б.Ж., Джанузакова Р.Ж. // Механика и моделирование процессов технологии. - 2010. - №1. - С.116-126.
- 94 **Стромберг А.Г.** Физическая химия [Текст] / Стромберг А.Г., Семченко Д.П. - М.: Высшая школа, 2001. - 527 с.

- 95 **Брановер Г.Г.** Магнитная гидродинамика несжимаемых сред [Текст] / Брановер Г.Г., Цинобер А.Б. - М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1970. - 380 с.
- 96 **Алимбаев Б.А.** Отчет по техническому обследованию зданий и сооружений суспензионной обогатительной фабрики и дробильно-размольной фабрики на филиале ТОО «Казфосфат» ГПК «Каратау» [Текст] / [Алимбаев Б.А., Манапбаев Б.Ж., Ескермесов Ж. и др.]. – Тараз, 2009. – 200 с.
- 97 **Алимбаев Б.А.** Отчет по техническому обследованию зданий: печное отделение, отделение грануляции, шихтовальное отделение, отделение сортировки и сушки сырья на ЖФ ТОО «Казфосфат» (НДФЗ) [Текст] / [Алимбаев Б.А., Манапбаев Б.Ж., Ескермесов Ж. и др.]. – Тараз, 2009. – 74 с.
- 98 **Алимбаев Б.А.** Развитие коррозии в элементах металлических конструкций в водной среде [Текст] / Алимбаев Б.А., Манапбаев Б.Ж. – Тараз: Тараз университеті, 2012. - 136 с.
- 99 **Алимбаев Б.А.** Развитие коррозии в сжатых элементах металлических конструкций [Текст] / Алимбаев Б.А., Манапбаев Б.Ж., Джанузакова Р.Ж. // Известия ВУЗов. - Бишкек, 2013. - №2. – С.23-25.
- 100 **Алимбаев Б.А.** Развитие коррозии в растянутых элементах металлических конструкций [Текст] / Алимбаев Б.А., Манапбаев Б.Ж., Джанузакова Р.Ж. – Мат. межд. науч.-практ. конф. «Индустриально-инновационное развитие Казахстана - проблемы экологии и безопасности жизнедеятельности». – Атырау: Атырауский институт нефти и газа, 2012. – С. 220-222.
- 101 **Алимбаев Б.А.** Влияние эффекта поперечного намагничивания на развитие коррозии изгибаемых элементов металлических конструкций гидротехнических сооружений [Текст] / Алимбаев Б.А., Манапбаев Б.Ж., Ескермесов Ж. // Мат. межд. науч.-практ. конф.: «Современные проблемы рационального использования водных ресурсов в Казахстане». - Тараз: Тараз университеті, 2011. – С. 42-46.

- 102 **Беда П.И.** Неразрушающий контроль металлов и изделий [Текст] / [Беда П.И., Выборнова Б.И., Глазков Ю.А. и др.]. – М.: Машиностроение, 1976. – С.132-133.
- 103 **Алимбаев Б.А.** Об одном механизме развития коррозии в водной среде [Текст] / Алимбаев Б.А., Манапбаев Б.Ж. // MATERIAŁY VIII MIĘDZYNARODOWEJ NAUKOWI-PRAKTYCZNEJ KONFERENCJI «EUROPEJSKA NAUKA XXI POWIEKA – 2012». – Praha: «Nauka i studia», 2012.
- 104 **Савельев И.В.** Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика [Текст] / Савельев И.В. - М.: Наука, 1987. – Т.1. - 432 с.
- 105 **Алимбаев Б.А.** Особенности развития коррозии в криволинейных участках стальных труб гидротехнических сооружений [Текст] / Алимбаев Б.А., Манапбаев Б.Ж., Джанузакова Р.Ж. // Известия ВУЗов. - Бишкек, 2013. - №2. – С.18-19.
- 106 **Алимбаев Б.А.** Анализ отказов работы металлических конструкций гидротехнических сооружений [Текст] / Алимбаев Б.А., Джанузакова Р.Ж.// Вестник Казахской головной архитектурно-строительной академии. – Алматы, 2006. - №1(9). - С.70-78.
- 107 **Гораздовский Т.Я.** Современный научно-технический прогресс и контроль качества материалов [Текст] / Гораздовский Т.Я. - М.: Знание, 1980. - 48 с.
- 108 **Алимбаев Б.** Повышение долговечности металлических конструкций гидротехнических сооружений [Текст] / [Алимбаев Б., Манапбаев Б.Ж., Джанузакова Р.Ж. и др.]. // Природопользование и проблемы антропосферы. - Тараз, 2010. - №1. - С.332-340.
- 109 **Балабанов В.И.** Нанотехнологии наука будущего [Текст] / Балабанов В.И. - М.: Эксмо, 2009. – 256 с.
- 110 **Денисова Н.Е.** Триботехническое материаловедение и триботехнология [Текст] / [Денисова Н.Е., Шорин В.А., Гонтарь И.Н. и др.]. – Пенза: Изд-во Пенз.гос. ун-та, 2006. - 248 с.

- 111 **Семенова Н.И.** Расчет параметров катодной защиты от коррозии гидросооружений [Текст] / Семенова Н.И. // Гидротехническое строительство. - 1974. - №9. – С.24-28.
- 112 **Герасименко А.А.** Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник [Текст]: в 2 т. / Герасименко А.А. и др. – М.: Машиностроение, 1987. - Т. 1. - 688 с.
- 113 **Алимбаев Б.А.** Надежность металлических конструкций и механического оборудования в гидротехнических сооружениях [Текст] / Алимбаев Б.А., Джанузакова Р.Ж. // Поиск. - Алматы, 2006. - №1. - С.278-280.
- 114 **Алимбаев Б.А.** Средства и методы контроля надежности металлических конструкций [Текст] / Алимбаев Б.А., Джанузакова Р.Ж. // Мат. Межд. науч.-практ. конф. «Проблемы водного хозяйства» посвященный 95-летию академика Р.Ж. Жулаева. - Тараз, 2006. - С.281-285.
- 115 **Алимбаев Б.А.** Проблемы металлических гидротехнических затворов [Текст] / Алимбаев Б., Манапбаев Б.Ж. // Вестник КазГАСА. - 2007. - №2. - С.68-71.