

№ 2345

Ю.А. Пустов  
А.Г. Ракоч

# **Диагностика и экспертиза коррозионных разрушений металлов**

Курс лекций

**№ 2345**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра защиты металлов и технологии поверхности

Ю.А. Пустов

А.Г. Ракоч

# **Диагностика и экспертиза коррозионных разрушений металлов**

Курс лекций

Допущено Учебно-методическим объединением высших учебных заведений РФ по образованию в области материаловедения, технологии материалов и покрытий в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 150100 «Материаловедение и технологии материалов», а также инженеров, обучающихся по специальности 150701 «Физико-химия процессов и материалов»



Москва 2013

УДК 620.193  
П89

Рецензент  
д-р техн. наук, проф. *А.В. Кудря*

**Пустов, Ю.А.**

П89 Диагностика и экспертиза коррозионных разрушений металлов : курс лекций / Ю.А. Пустов, А.Г. Ракоч. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2013. – 131 с.  
ISBN 978-5-87623-745-3

Описаны цели, задачи и общие требования к экспертизе и диагностике коррозионного состояния металлов. Представлена нормативно-техническая и методическая документация, используемая при проведении экспертизы коррозионного состояния металлических материалов и конструкций. Описаны диагностические признаки проявления различных видов коррозионных поражений металлов и сплавов, взаимосвязь между характером коррозионного разрушения и условиями эксплуатации, химическим составом и структурным состоянием сплавов. Приведены примеры проведения экспертизы коррозионного состояния некоторых объектов, экспертной оценки возможности применения различных металлических материалов в условиях контакта в коррозионно-активной среде, оформления «Заключения экспертизы промышленной безопасности», включающей, в том числе, анализ коррозионного состояния химического оборудования на одном из предприятий.

Курс лекций предназначен для студентов, обучающихся по специальности 150701 «Физико-химия процессов и материалов», студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлению 150100 «Материаловедение и технологии материалов» (профиль «Физико-химия процессов и материалов»). Может быть рекомендован аспирантам, работающим в области исследований коррозионных процессов, диагностики и экспертизы коррозионного состояния металлов и сплавов.

**УДК 620.193**

**ISBN 978-5-87623-745-3**

© Ю.А. Пустов,  
А.Г. Ракоч, 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	5
Термины и определения .....	6
Введение .....	7
1. Основные задачи и требования к проведению диагностики коррозионного состояния металлоконструкций и сооружений .....	8
2. Коррозионный мониторинг, прогнозирование и экспертиза .....	9
2.1. Коррозионный мониторинг .....	9
2.2. Методы мониторинга неразрушающего контроля .....	10
2.2.1. Визуальный и измерительный контроль .....	10
2.2.2. Акустические методы .....	12
2.2.3. Магнитный метод .....	19
2.2.4. Капиллярный метод .....	19
2.2.5. Вихретоковый метод .....	20
2.3. Коррозионное прогнозирование .....	20
2.4. Коррозионная экспертиза .....	21
3. Электрохимическая гетерогенность поверхности и характер коррозионного разрушения металлов .....	22
4. Классификация коррозионных процессов по условиям протекания и характеру коррозионного разрушения .....	26
5. Сплошная (общая) коррозия .....	29
6. Местная (локальная) коррозия .....	32
6.1. Межкристаллитная коррозия .....	33
6.1.1. Определение межкристаллитной коррозии. Диагностические признаки. Причины и условия возникновения .....	33
6.1.2. Механизмы межкристаллитной коррозии .....	36
6.1.3. Факторы, влияющие на межкристаллитную коррозию .....	40
6.2. Питтинговая коррозия .....	46
6.2.1. Определение питтинговой коррозии. Диагностические признаки, основные понятия и термины. Причины и условия возникновения .....	46
6.2.2. Механизмы питтинговой коррозии .....	49
6.2.3. Вероятностные теории питтинговой коррозии .....	52
6.2.4. Влияние различных факторов на питтинговую коррозию металлов и сплавов .....	52
6.3. Щелевая коррозия .....	60
6.3.1. Определение щелевой коррозии, зоны проявления, особенности и диагностические признаки .....	60
6.3.2. Механизм щелевой коррозии .....	60
7. Коррозионно-механическое разрушение металлов .....	63
7.1. Общая коррозия напряженного металла .....	63
7.2. Коррозионное и водородное растрескивание .....	64

7.2.1. Определение, условия возникновения, диагностические признаки коррозионного растрескивания .....	64
7.2.2. Механизмы коррозионного растрескивания .....	67
7.2.3. Коррозионное и водородное растрескивание сталей .....	72
7.2.4. Коррозионное растрескивание сплавов цветных металлов .....	74
7.2.5. Коррозионное растрескивание мартенситных, ферритных и двухфазных сталей .....	76
7.2.6. Влияние различных факторов на развитие коррозионного растрескивания аустенитных сталей .....	78
7.2.6.1. Хлоридное коррозионное растрескивание аустенитных сталей .....	78
7.2.6.2. Щелочное коррозионное растрескивание аустенитных сталей .....	86
7.3. Коррозионная усталость металлов .....	88
7.3.1. Определение, условия возникновения, диагностические признаки коррозионной усталости .....	88
7.3.2. Механизм коррозионной усталости .....	90
7.4. Коррозионная кавитация (кавитационная коррозия) .....	91
7.4.1. Определение, условия возникновения и характер воздействия .....	91
7.4.2. Определение местоположения возможных повреждений и их идентификация .....	94
7.4.3. Зависимость кавитационного разрушения от температуры .....	95
7.4.4. Механизм коррозионной кавитации .....	96
7.5. Фреттинг-коррозия (эрозийная коррозия) .....	96
7.5.1. Определение, условия возникновения, области распространения фреттинг-коррозии .....	96
7.5.2. Факторы, влияющие на коррозионно-механический износ .....	97
7.5.3. Механизм фреттинг-коррозии .....	102
7.5.4. Фреттинг-усталость .....	103
8. Расслаивающая (подповерхностная) коррозия .....	105
8.1. Определение, диагностические признаки расслаивающей коррозии и классификация алюминиевых сплавов по стойкости к расслаивающей коррозии .....	105
8.2. Анизотропия коррозионных свойств .....	107
8.3. Влияние термообработки и состава сплавов на развитие расслаивающей коррозии .....	109
8.4. Механизм расслаивающей коррозии .....	110
Библиографический список .....	115
Приложения .....	116

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В основу настоящей работы положены материалы лекций по курсу «Диагностика и экспертиза коррозионных разрушений», читаемых студентам Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», обучающихся по специальности «Физико-химия процессов и материалов».

Сложившаяся в Российской Федерации система диагностики, экспертизы и мониторинга состояния промышленных объектов основана на отраслевых стандартах (стандартах организации), предусматривающих выполнение комплекса организационно-технических мероприятий при проведении обследований состояния системы. Обследование коррозионного состояния объектов является составной частью общей системы оценки промышленной безопасности металлоконструкций и сооружений, эксплуатируемых в отрасли.

В связи с многообразием отраслей промышленности (добыча и транспортировка нефти и газа, химическая, металлургическая, машиностроительная, судостроительная, авиационная и др.) и эксплуатируемых объектов в рамках данного курса лекций не представляется возможным освещение особенностей проведения коррозионного обследования металлоконструкций в каждой из конкретных отраслей.

Целью курса лекций является обобщение основных принципов и подходов к оценке коррозионного состояния металлопродукции в связи с требованиями организационно-технического, нормативного и методического сопровождения. Вместе с тем не менее важным при проведении коррозионного обследования являются учет особенностей коррозионно-активной среды, состава и структурного состояния сплавов, влияние механических (статических и динамических) нагрузок на вероятность развития и распространения того или иного вида коррозионного разрушения металлических материалов в конкретных условиях эксплуатации, чему уделено значительное место.

## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Диагностика** (техническая) – область знаний, охватывающая теорию, методы, средства и технологии определения технического состояния объектов (согласно ГОСТ 20911–89).

**Коррозионная диагностика** – комплекс работ, включающий сбор и анализ данных для определения состояния противокоррозионной защиты, оценки коррозионного состояния и выявления тенденций коррозии металлоконструкций и сооружений.

**Мониторинг** – система сбора/регистрации, хранения и анализа небольшого количества ключевых (явных или косвенных) признаков/параметров описания данного объекта для вынесения суждения о поведении/состоянии данного объекта в целом, т.е. для вынесения суждения об объекте в целом на основании анализа небольшого количества характеризующих его признаков.

**Коррозионный мониторинг** – комплексная система мер, направленных на снижение вероятности коррозионного разрушения отдельных фрагментов металлических конструкций.

**Экспертиза** – исследование специалистом (экспертом) каких-либо вопросов, решение которых требует специальных познаний в области науки, техники, искусства и т.д.

**Коррозионная экспертиза** – исследование специалистом (экспертом в области коррозии и защиты металлов) коррозионного состояния металлоконструкций и сооружений, установление вида, характера и причины коррозионного разрушения металлов и сплавов, из которых изготовлены объекты.

**Прогнозирование** – установление (предсказание) сроков безотказной работы элементов металлоконструкции и/или оборудования до очередного технического обслуживания или ремонта.

## ВВЕДЕНИЕ

Выявление повреждений на ранних стадиях или предпосылок к ним (диагностика), а также предвидение их развития (прогнозирование) позволяют правильно оценивать условия эксплуатации аппаратов, машин, оборудования и сооружений, определять эффективность применения методов и средств защиты и принимать решение об их совершенствовании. Одним из требований к условиям эффективной эксплуатации действующих объектов является определение их остаточного ресурса, т.е. суммарной наработки от момента контроля технического состояния объектов до перехода в предельное состояние.

Основным элементом, обеспечивающим выполнение этих условий, является техническая диагностика. Техническая диагностика является составной частью технического обслуживания. Главной задачей технического диагностирования является обеспечение безопасности, функциональной надежности и эффективности работы технического объекта, а также сокращение затрат на его техническое обслуживание и уменьшение потерь от простоев в результате отказов и преждевременных выводов в ремонт.

Особое место при проведении технического диагностирования объектов занимает коррозионная диагностика, включающая в себя проведение цикла работ по оценке коррозионного состояния металлов и сплавов, из которых изготовлены металлоконструкции, и тенденций развития коррозионного процесса.

Неотъемлемой частью технической диагностики является мониторинг. Под мониторингом здесь понимают непрерывный процесс сбора и анализа информации о значении диагностических параметров состояния объекта.

Эффективным способом оценки коррозионного состояния оборудования (на стадиях его проектирования, эксплуатации, реновации (реконструкция, ремонт)) является коррозионный мониторинг – система наблюдений и прогнозирования коррозионного состояния объекта с целью получения своевременной информации об его возможных коррозионных отказах.

Заключительным этапом проведения коррозионного обследования является коррозионная экспертиза, на основании которой составляется официальное заключение о состоянии объекта, причинах и видах коррозионного разрушения металлоконструкции, даются рекомендации по его дальнейшей эксплуатации (прогноз), устанавливается необходимость ремонта или полного прекращения эксплуатации.



# **1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И ТРЕБОВАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ДИАГНОСТИКИ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Основными задачами контроля и диагностики состояния металлопродукции являются определение технического состояния на основе комплексного мониторинга в процессе создания и эксплуатации системы, оценка и прогнозирование динамики технического состояния с целью обеспечения надежной и безопасной эксплуатации объекта.

Диагностика коррозионного состояния является составной частью общей системы диагностики состояния металлопродукции (конструкций и сооружений), учитывающей результаты контроля на всех этапах ее жизненного цикла от проектирования, строительства объекта, сдачи в эксплуатацию, приработки и нормального функционирования до этапов старения системы, ее ремонта и восстановления работоспособности. Оценка коррозионного состояния системы и ее параметров должна производиться на основе специально разработанных методик, инструкций, рекомендаций и других нормативных документов, определяемых общими требованиями к проведению экспертизы коррозионного состояния металлических материалов и конструкций (прил. 1) и отраслевыми стандартами на определенные виды металлопродукции (трубы, металлопрокат, металлические конструкции, агрегаты металлургического и химического производства и т.п.) и условия эксплуатации (добыча, транспортировка нефти и газа, агрессивная атмосфера промышленных предприятий, производство химических веществ, целлюлозы и т.п.).

Стандарты устанавливают требования к организации, к составу и порядку выполнения работ при проведении коррозионных обследований (КО) объектов, методическому, нормативному и информационному обеспечению работ, квалификации специалистов и техническому оснащению организаций, выполняющих коррозионные обследования, документации, оформляемой по результатам КО (например: Стандарт организации. Организация коррозионных обследований объектов ОАО «Газпром». Основные требования. СТО Газпром 2-2.3-310-2009. Москва, 2009).

К выполнению работ по КО привлекаются исполнители (организации, специалисты), имеющие необходимый, в соответствии с действующим законодательством, пакет документов на те виды работ, которые требуют специального разрешения. Возможности по обеспечению качества КО должны быть подтверждены исполнителем предъявлением документов, обосновывающих соответствие системы менеджмента качества исполнителя требованиям стандартов ИСО 9000 с соответствующей областью сертификации.

## 2. КОРРОЗИОННЫЙ МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРТИЗА

### 2.1. Коррозионный мониторинг

Неотъемлемой частью коррозионной диагностики является коррозионный мониторинг (КМ) – своевременное получение данных по коррозионному состоянию объекта и эффективности его защиты. Задача КМ – получение в режиме реального времени информации об изменении коррозионной ситуации, отслеживание изменения скорости коррозии и агрессивности коррозионной среды.

При проведении КМ осуществляется оценка состояния коррозионных поражений, защитных покрытий и механических повреждений.

При оценке состояния коррозионных поражений определяются:

- вид коррозионного поражения;
- площадь коррозионного поражения;
- остаточная толщина металла в местах коррозионных поражений;
- глубина коррозии локальных повреждений металла;
- геометрические размеры сквозных коррозионных поражений.

При оценке состояния защитных покрытий определяются:

- тип дефекта защитного покрытия;
- площадь разрушенного покрытия;
- адгезия сохранившегося покрытия;
- толщина защитного покрытия;
- защитные свойства покрытия.

При оценке состояния механических повреждений определяются:

- геометрические размеры трещин, разрывов, вмятин, пробоин элементов металлоконструкций;
- дефекты сварных и болтовых соединений.

Жизненный цикл любой металлоконструкции включает четыре стадии: проектирование, изготовление, эксплуатация, реновация.

*Мониторинг на стадии проектирования* предусматривает правильность выбора конструкционных материалов и решений (рациональное конструирование) с учетом особенностей их эксплуатации и расчета долговечности конструкции.

*Мониторинг на стадии эксплуатации* заключается в периодической диагностике коррозионного состояния оборудования. Регламент мониторинга определяется условиями эксплуатации диагностируемой системы. Используются следующие методы непрерывного (или периодического) контроля состояния объекта:

- визуальный осмотр;
- осмотр труднодоступных участков оборудования при помощи телеметрических систем;
- определение технологических свойств коррозионной среды (окислительно-восстановительного потенциала, наличия продуктов растворения элементов металлической конструкции, изменения концентрации коррозионно-активных агентов и др.);
- определение структурного состояния металла;
- определение электрохимического потенциала металла;
- определение скорости коррозии образцов-свидетелей;
- определение электрического сопротивления образцов-свидетелей;
- ультразвуковая, магнитометрическая и акустическая дефектоскопия.

*Мониторинг на стадии реновации* включает контроль технических решений по конструкционным и восстановительным работам и прогнозирование его дальнейшей эксплуатации с учетом этих работ.

## **2.2. Методы мониторинга неразрушающего контроля**

*Неразрушающий контроль (НК)* – это измерение физических параметров различных сред без вмешательства в среду их передачи. Для этого используются приборы неразрушающего контроля, которые производят все необходимые измерения без физического вмешательства в саму среду и средства ее передачи. Приборами неразрушающего контроля являются: анализаторы металла и среды, дефектоскопы, толщиномеры, твердомеры, рентгенотелевизионные установки. Однако в ряде случаев достаточно информативными способами оценки технического состояния металлопродукции являются внешний осмотр и визуальный измерительный контроль.

### **2.2.1. Визуальный и измерительный контроль**

*Визуальный и измерительный контроль* занимает важное место среди различных видов контроля состояния металлоизделий и конструкций. Визуальный контроль – это единственный неразрушающий метод контроля, который может выполняться и часто выполняется без какого-либо оборудования и проводится с использованием простейших измерительных средств. Визуальный контроль является наиболее дешевым и оперативным методом контроля.

Визуальный и измерительный контроль могут проводить и давать заключение по его результатам только квалифицированные специалисты. Для эффективного выявления дефектов они должны уметь выбрать подход, разработать методику проведения осмотра и создать необходимые приспособления.

Операция проведения внешнего осмотра проста, однако такой контроль является исключительно информативным и высокоэффективным средством обнаружения дефектов и предупреждения разрушений. Несмотря на простоту, визуальный измерительный контроль следует считать таким же современным видом контроля, как и любой другой (например, радиационный или ультразвуковой).

Цель визуального контроля – выявление поверхностных повреждений (трещин, коррозионных повреждений, деформированных участков, наружного износа и т.д.). Цель измерительного контроля – определение соответствия геометрических размеров и допустимости повреждений материала и сварных соединений, выявленных при визуальном контроле, требованиям рабочих чертежей, ТУ, стандартов и паспортов.

При оценке состояния материала и сварных соединений в процессе эксплуатации металлоконструкций и сооружений визуальный и измерительный контроль выполняют в соответствии с требованиями руководящих документов (методических указаний) по оценке (экспертизе) конкретных технических устройств и сооружений.

Поверхности металлических материалов и сварных соединений (наплавки) перед контролем очищаются от влаги, шлака, брызг металла, ржавчины и других загрязнений, препятствующих проведению контроля.

Визуальный и измерительный контроль проводят невооруженным глазом и (или) с применением визуально-оптических приборов до 20-кратного увеличения. Его выполняют до других методов неразрушающего контроля.

Современные методы оптического контроля основаны на взаимодействии светового излучения с поверхностью контролируемого объекта. При этом рассматриваются такие спектральные характеристики, как коэффициент спектрального излучения и поглощения, спектральный коэффициент пропускания, отражения и показатель преломления.

### 2.2.2. Акустические методы

*Акустические методы* неразрушающего контроля состояния металлоконструкций применяются в различных областях: объекты газовой, нефтяной, металлургической и горнорудной промышленности, системы водо- и газоснабжения, подъемные сооружения, объекты и оборудование взрывопожароопасных и химически опасных производств, объекты железнодорожного транспорта.

Акустические методы основаны на регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых или возникающих в металлическом объекте. Чаще всего используют упругие волны ультразвукового диапазона (с частотой колебаний выше 20 кГц). Параметры этих волн тесно связаны с такими свойствами материалов, как упругость, плотность, анизотропия (неравномерность свойств по различным направлениям) и др.

Акустические свойства твердых материалов и воздуха настолько сильно отличаются, что акустические волны отражаются от тончайших макродефектов структуры металла (трещин, щелей, коррозионных каверн, язв) шириной  $10^{-6} \dots 10^{-4}$  мм. С помощью акустических методов измеряют толщины стенок изделий, неоднородности структуры, определяют геометрические характеристики изделий.

Колебания в исследуемый объект вводятся в импульсном или непрерывном режимах с помощью пьезоэлектрического преобразователя сухим контактным, контактным через жидкую среду или бесконтактным способом через воздушный зазор с помощью электромагнитно-акустического преобразователя.

При акустическом контроле обычно используют колебания с частотой 0,5...25 МГц, т.е. ультразвуковые. Поэтому большинство акустических методов являются ультразвуковыми.

Для возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний используют пьезоэлектрический эффект, заключающийся в изменении геометрических размеров некоторых материалов (кварц, титанат бария, титанат-цирконат свинца и др.) с частотой изменения величины действующего переменного электрического поля.

Пьезоэлектрическую пластину помещают в специальном устройстве-пьезопреобразователе (искателе). Материалы, используемые в пьезопреобразователях (плексиглас, капролон, фторопласт, полистирол), способствуют гашению отраженной волны, так как имеют большие коэффициенты затухания ультразвуковых колебаний и малую скорость их распространения. При падении ультразвуковой волны на поверхность раздела двух сред, в частности, на границу дефекта, часть энергии отражается, что и используется при контроле.