

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ
И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ,
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ
В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ**



«Инфра-Инженерия»

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ
И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ,
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ
В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ**

Монография

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2020

УДК 669.018
ББК 34.2
Ф50

Авторы:

*Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев,
М. В. Ушаков, В. В. Извольский*

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования *В. Н. Гадалов* (Юго-Западный государственный университет);

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой строительства, строительных материалов и конструкций *А. А. Трещев* (Тульский государственный университет)

Ф50 **Физико-механические и коррозионные свойства металлических материалов, эксплуатируемых в агрессивных средах** : монография / [Н. Н. Сергеев и др.] – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 556 с.

ISBN 978-5-9729-0451-8

Рассмотрены теоретические и прикладные вопросы хрупкого разрушения высокопрочных металлических сплавов на железной основе различных систем легирования, эксплуатируемых в водородсодержащих средах. Представлены методики испытаний сплавов, оценено влияние различных факторов на чувствительность сплавов к коррозионно-механическому разрушению, выявлены кинетические закономерности процессов разрушения. Предложены физико-химические методы защиты черных и цветных металлов и сплавов. Исследованы процессы атмосферной коррозии металлических конструкций.

Для научных работников и специалистов по металловедению и термической обработке металлов и сплавов, физике прочности и пластичности, механике обработки металлов давлением, материаловедению, строительным технологиям, композиционным материалам, технологиям машиностроения и рациональному природопользованию. Издание также может быть полезно преподавателям и студентам соответствующих специальностей.

УДК 669.018
ББК 34.2

ISBN 978-5-9729-0451-8

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА I. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	11
1.1. Разрушение металлических материалов в процессе электрохимической коррозии	11
1.2. Коррозионно-механическое разрушение металлов под действием водорода	21
1.3. Физико-химические и механические предпосылки коррозионно-механического разрушения.....	23
1.4. Влияние внутренних и внешних факторов на процесс коррозионно-механического разрушения.....	28
1.4.1. Влияние анодных и катодных процессов	30
1.4.2. Влияние напряжения.....	34
1.4.3. Влияние состояния сплава (химического состава, легирования, структуры и субструктуры) на водородное растрескивание	35
1.4.4. Влияние концентрации агрессивных сред на скорость коррозии и склонность стали к хрупкому разрушению.....	37
1.5. Взаимодействие водорода с металлическими материалами.....	39
1.5.1. Структурные и фазовые превращения, протекающие в сталях при взаимодействии с водородом.....	39
1.5.2. Процессы взаимодействия водорода с дефектами кристаллического строения металлов и сплавов	40
1.5.3. Взаимодействие водорода с дислокациями.....	44
1.6. Растворимость, проникновение и диффузия водорода в металлических материалах	47
1.6.1. Растворимость и состояние водорода в металлах.....	47
1.6.2. Механизм проникновения водорода в металлические материалы.....	49
1.6.3. Диффузия водорода в металлических материалах	52
1.7. Теории и механизмы водородного растрескивания	55
1.8. Физико-химические методы защиты металлов от коррозионно-механического разрушения	73
1.8.1. Классификация методов противокоррозионной защиты.....	73
1.8.2. Методы защиты от водородного коррозионного растрескивания и коррозионной усталости.....	75
ГЛАВА II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	82
2.1. Разработка методики сравнительных ускоренных лабораторных испытаний арматурных сталей на стойкость против коррозионно-механического разрушения в водородсодержащих средах	82
2.1.1. Характеристика исследуемых материалов	82
2.1.2. Выбор критериев разрушения, оценки длительной прочности, характеристика исследуемых образцов и коррозионных камер	84
2.1.3. Выбор состава и температуры агрессивной среды.....	91
2.2. Метод внутреннего трения	104

2.3. Методы определения концентрации водорода	107
2.3.1. Определение диффузионного потока водорода через металл катода.....	107
2.3.2. Определение количества абсорбированного металлом водорода .	109
2.3.3. Определение величины наводороживания по изменению физико-механических свойств металла.....	109
2.4. Разработка комплексной методики проведения испытаний по определению физико-механических и коррозионных свойств защитных покрытий	110
2.4.1. Методика оценки коррозионной стойкости защитных покрытий	110
2.4.2. Методика оценки физико-механических свойств защитных покрытий	121
2.5. Методика рентгенографического анализа	126
2.6. Методика металлографического анализа.....	128

ГЛАВА III. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СТАЛИ К КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОМУ РАЗРУШЕНИЮ.....

3.1. Сравнительная стойкость сталей в состоянии поставки	129
3.2. Влияние степени чистоты стали на склонность к водородному растрескиванию	136
3.3. Влияние дополнительного легирования на чувствительность стали к коррозионно-механическому разрушению.....	141
3.4. Влияние видов и режимов термической обработки на сопротивляемость стали коррозионно-механическому разрушению.....	153
3.4.1. Обработка против водородного растрескивания	154
3.4.2. Обработка против коррозионного растрескивания под напряжением.....	160
3.5. Влияние температуры и продолжительности отпуска на стойкость стали к коррозионно-механическому разрушению	165
3.6. Влияние режимов отпуска на длительную прочность арматурных сталей в водородсодержащих средах	192

ГЛАВА IV. КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ.....

4.1. Влияние уровня приложенных растягивающих напряжений на чувствительность стали к водородному растрескиванию.....	202
4.2. Влияние внутренних и внешних факторов на чувствительность стали к коррозионно-механическому разрушению.....	209
4.2.1. Влияние состава коррозионной среды на длительную прочность	210
4.2.2. Влияние остаточных растягивающих напряжений на длительную прочность.....	213
4.2.3. Влияние среды и катодной поляризации на длительную прочность	216
4.2.4. Влияние среды и напряжений на длительную прочность	217
4.2.5. Влияние среды, напряжений и катодной поляризации на длительную прочность.....	224

4.2.6. Влияние масштабного эффекта и состояния поверхности на длительную прочность.....	226
4.3. Особенности и механизмы локального обезуглероживания арматурных сталей в процессах низкотемпературного водородного растрескивания	229
4.4. Кинетические закономерности распространения коррозионных трещин	234
4.5. Прогнозирование долговечности арматурного проката в условиях коррозионного растрескивания	253
ГЛАВА V. ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА АРМАТУРНОГО ПРОКАТА.....	
5.1. Разработка оптимальных режимов термомеханического и термического упрочнения арматурного проката	268
5.2. Влияние отпуска на механические и коррозионные свойства стали после ВТМО.....	283
5.3. Микроструктура и тонкое строение стали после ВТМО и отпуска.....	291
ГЛАВА VI. ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ	
6.1. Применение, методы нанесения и структура защитных покрытий	296
6.2. Металлографические исследования порошковых покрытий	299
6.3. Исследование структуры и фазового состава интерметаллических покрытий в агрессивной среде	305
6.4. Влияние наплавленного защитного слоя на упругие и неупругие характеристики материала основы	309
6.4.1. Температурные зависимости внутреннего трения и модуля упругости стали 30ХГСА.....	309
6.4.2. Влияние покрытий на поглощение энергии в материале	310
6.4.3. Влияние покрытий на изменение модуля Юнга материала основы	317
6.4.4. Обсуждение полученных результатов	318
6.5. Исследование адгезионной прочности покрытий на срез	321
6.6. Исследование когезионной прочности покрытий	332
6.7. Влияние процесса оплавления на когезионную прочность	342
ГЛАВА VII. ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ, ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ	
7.1. Коррозионная стойкость конструкционных сталей	349
7.2. Коррозионная стойкость порошковых материалов	357
7.2.1. Исследование коррозионной стойкости металлических порошков.....	357
7.2.2. Исследование коррозионной стойкости интерметаллических порошков	362
7.3. Коррозионная стойкость защитных покрытий без основы.....	374

7.3.1. Исследование коррозионной стойкости металлических покрытий	374
7.3.2. Исследование коррозионной стойкости интерметаллических покрытий	383
7.4. Металлографические и коррозионные исследования стальных образцов с металлическими покрытиями, наносимыми методом плазменного напыления	396
7.5. Исследование влияния механической обработки на коррозионную стойкость интерметаллических покрытий.....	433
7.6. Исследование влияния толщины защитных интерметаллических покрытий и уровня растягивающих напряжений на коррозионную стойкость	450
7.7. Коррозионная стойкость интерметаллических защитных покрытий в агрессивных газовых средах	454
7.8. Коррозионная стойкость комбинированных защитных покрытий.....	461
ГЛАВА VIII. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ С НАНЕСЕННЫМИ ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ	470
8.1. Характеристика условий эксплуатации азотенков	470
8.2. Влияние атмосферной коррозии на процесс разрушения металлоконструкций	474
8.3. Оценка атмосферной коррозии. Методы защиты, защитная способность покрытий.....	476
8.4. Исследование влияния технологических режимов нанесения защитных покрытий на физико-механические свойства металлоконструкций	480
8.5. Сравнительная коррозионная стойкость сварных металлоконструкций с покрытиями в различных агрессивных средах.....	489
8.6. Коррозионная стойкость комбинированных покрытий на углеродистой стали Ст3	498
8.7. Сравнительная коррозионная стойкость сварных металлоконструкций с покрытиями в среде хозяйственно-бытовых стоков очистных сооружений.....	501
8.8. Корреляция между результатами ускоренных и натурных испытаний.....	506
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	509
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	510