

**ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ  
ДОЛГОВЕЧНОСТИ  
ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ,  
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ  
В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ**

---



«Инфра-Инженерия»

**ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ  
ДОЛГОВЕЧНОСТИ  
ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ,  
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ  
В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ  
СРЕДАХ**

*МОНОГРАФИЯ*

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2021

УДК 669.18.018.295

ББК 34.25

О-75

*А в т о р ы :*

*Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Куменов, Г. М. Журавлев, А. Е. Гвоздев*

*Р е ц е н з е н т ы :*

доктор технических наук, профессор кафедры  
машиностроительных технологий и оборудования  
Юго-Западного государственного университета *В. Н. Гадалов;*

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
строительства, строительных материалов и конструкций  
Тульского государственного университета *А. А. Трещев*

**О-75 Основы повышения долговечности высокопрочных сталей, эксплуатируемых в водородсодержащих средах : монография / [Н. Н. Сергеев и др.] . – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 352 с.  
ISBN 978-5-9729-0532-4**

Рассмотрены вопросы хрупкого разрушения высокопрочных металлических сплавов на железной основе различных систем легирования, эксплуатируемых в водородсодержащих средах. Представлены методики, оснастка, оборудование и образцы для испытаний на длительную прочность арматурных сталей и металлических высокопрочных сплавов. Оценено влияние качества шихтовых материалов, процессов термической, термомеханической обработки и легирования на чувствительность металлических сплавов к коррозионно-механическому разрушению. Выявлены кинетические закономерности процессов разрушения высокопрочных сталей в условиях воздействия механических, тепловых, концентрационных полей и агрессивных сред. Предложены физико-химические комплексные методы защиты черных и цветных металлов и сплавов.

Для специалистов в области металловедения и обработки металлов и сплавов, материаловедения, строительных технологий, технологий машиностроения и рационального природопользования, а также преподавателей и студентов соответствующих направлений подготовки.

УДК 669.18.018.295  
ББК 34.25

ISBN 978-5-9729-0532-4

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА I. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ХРУПКОМ РАЗРУШЕНИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОДОРОДА.....	10
1.1. Разрушение металлических материалов в процессе электрохимической коррозии .....	10
1.2. Коррозионно-механическое разрушение металлов под действием водорода .....	20
1.3. Физико-химические и механические предпосылки коррозионно-механического разрушения.....	22
1.4. Влияние внутренних и внешних факторов на процесс коррозионно-механического разрушения.....	27
1.4.1. Влияние анодных и катодных процессов .....	28
1.4.2. Влияние напряжений.....	33
1.4.3. Влияние состояния сплава (химического состава, легирования, структуры и субструктуры) на водородное растрескивание.....	34
1.4.4. Влияние концентрации сред на скорость коррозии и склонность стали к хрупкому разрушению.....	35
1.4.5. Влияние примесей.....	37
1.5. Взаимодействие водорода с металлическими материалами .....	41
1.5.1. Структурные и фазовые превращения, протекающие в сталях при взаимодействии с водородом .....	41
1.5.2. Процессы взаимодействия водорода с дефектами кристаллического строения металлов и сплавов .....	42
1.5.3. Взаимодействие водорода с дислокациями.....	47
1.6. Растворимость, проникновение и диффузия водорода в металлических материалах.....	49
1.6.1. Растворимость и состояние водорода в металлах .....	49
1.6.2. Механизм проникновения водорода в металлические сплавы ..	51
1.6.3. Диффузия водорода в металлических материалах .....	54
1.7. Теории и механизмы водородного растрескивания .....	57
1.8. Физико-химические методы защиты металлов и сплавов от коррозионно-механического разрушения.....	74
1.8.1. Классификация методов противокоррозионной защиты.....	74
1.8.2. Методы защиты от водородного коррозионного растрескивания и коррозионной усталости.....	75
ГЛАВА II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....	82
2.1. Комплексная методика 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 образцов и коррозионных камер.....	84
2.1.3. Выбор состава и температуры агрессивной среды.....	91
2.2. Использование метода внутреннего трения для исследования влияния водорода на субмикроструктурные изменения материала.....	103
2.3. Методы определения концентрации водорода .....	106
2.3.1. Определение диффузионного потока водорода через металл катода.....	107
2.3.2. Определение количества абсорбированного металлом водорода.....	108
2.3.3. Определение величины наводороживания по изменению физико-механических свойств металла .....	109
2.4. Методика рентгенографического анализа.....	110
<b>ГЛАВА III. ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ШИХТЫ, ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ</b>	
<b>СТАЛИ К КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОМУ РАЗРУШЕНИЮ .....</b>	<b>112</b>
3.1. Сравнительная стойкость сталей в состоянии поставки.....	112
3.2. Влияние степени чистоты стали на склонность к водородному растрескиванию .....	118
3.3. Влияние дополнительного легирования на чувствительность стали к коррозионно-механическому разрушению .....	123
3.4. Влияние видов и режимов термической обработки на сопротивляемость стали коррозионно-механическому разрушению.....	135
3.4.1. Обработка против водородного растрескивания.....	136
3.4.2. Обработка против коррозионного растрескивания под напряжением.....	142
3.5. Влияние температуры и продолжительности отпуска на стойкость стали к коррозионно-механическому разрушению .....	146
3.6. Влияние режимов отпуска на длительную прочность арматурных сталей в водородсодержащих средах .....	173
<b>ГЛАВА IV. КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА</b>	
<b>КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ.....</b>	<b>181</b>
4.1. Влияние уровня приложенных растягивающих напряжений на чувствительность стали к водородному растрескиванию .....	181
4.2. Влияние внутренних и внешних факторов на чувствительность стали к коррозионно-механическому разрушению .....	188
4.2.1. Влияние состава коррозионной среды на длительную прочность .....	189
4.2.2. Влияние остаточных растягивающих напряжений на длительную прочность .....	193
4.2.3. Влияние среды и катодной поляризации на длительную прочность .....	195
4.2.4. Влияние среды и напряжений на длительную прочность .....	196



4.2.5. Влияние среды, напряжений и катодной поляризации на длительную прочность .....	204
4.2.6. Влияние масштабного эффекта и состояния поверхности на длительную прочность .....	205
4.3. Особенности и механизмы локального обезуглероживания арматурных сталей в процессах низкотемпературного водородного растрескивания .....	208
4.4. Кинетические закономерности распространения коррозионных трещин .....	213
4.5. Прогнозирование долговечности арматурного проката в условиях коррозионного растрескивания .....	232
<b>ГЛАВА V. ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА АРМАТУРНОГО ПРОКАТА .....</b>	<b>246</b>
5.1. Разработка оптимальных режимов термического и термомеханического упрочнения арматурного проката .....	246
5.2. Влияние отпуска на механические и коррозионные свойства стали после ВТМО .....	260
5.3. Микроструктура и тонкое строение стали после ВТМО и отпуска .....	269
<b>ГЛАВА VI. ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ НА СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛОВ ПРОТИВ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ .....</b>	<b>273</b>
6.1. Способы поверхностного упрочнения металлов .....	273
6.2. Упрочнение металлов в процессе пластической деформации .....	280
6.3. Теоретическое описание предельной пластической деформации ....	285
6.4. Прогнозирование максимального упрочнения в процессах пластического формоизменения .....	296
6.4.1. Упрочнение металлов и сплавов в процессе прямого выдавливания .....	296
6.4.2. Анализ напряженно-деформированного состояния .....	303
6.4.3. Определение показателя напряженного состояния и диаграммы пластичности .....	305
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>310</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>313</b>