

# ВОДОРОДНОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ И РАСТРЕСКИВАНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОЙ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ

---

Н. Н. Сергеев  
А. Н. Сергеев



«Инфра-Инженерия»

**Н. Н. Сергеев**  
**А. Н. Сергеев**

**ВОДОРОДНОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ  
И РАСТРЕСКИВАНИЕ  
ВЫСОКОПРОЧНОЙ  
АРМАТУРНОЙ СТАЛИ**

*Монография*

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2021

УДК 666.982.24  
ББК 34.222.235  
С32

*Рецензенты:*

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;*

доктор технических наук, профессор по кафедре физики металлов  
и материаловедения, главный научный сотрудник Тульского государственного  
педагогического университета им. Л. Н. Толстого *А. Е. Гвоздев*

**Сергеев, Н. Н.**

**С32** Водородное охрупчивание и растрескивание высокопрочной  
арматурной стали : монография / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев. –  
Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 172 с.  
ISBN 978-5-9729-0542-3

Исследованы процессы водородного охрупчивания и коррозионного растрескивания, протекающие в промышленных высокопрочных арматурных сталях. Разработаны новые методики, установки и оборудование для исследования; установлены закономерности развития процессов охрупчивания и разрушения сталей в различных физико-химических полях и водородных средах. Исследованы процессы термической и термомеханической обработки арматурных сталей для получения высокопрочных профилей, применяемых для изготовления композиционных армированных железобетонных конструкций и изделий.

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 и технологиям машиностроения. Издание может быть полезно студентам и преподавателям соответствующих специальностей.

УДК 666.982.24  
ББК 34.222.235

ISBN 978-5-9729-0542-3

© Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, 2021

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....   | 5  |
| <b>ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА<br/>И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....   | 8  |
| 1.1. Растрескивание металлов под напряжением<br>в коррозионных средах.....  | 8  |
| 1.2. Условия растрескивания при водородном охрупчивании.....  | 11 |
| 1.2.1. Влияние анодных и катодных процессов.....  | 11 |
| 1.2.2. Влияние напряжения.....  | 16 |
| 1.2.3. Влияние состояния сплава (химического состава, легирования,<br>структуры и субструктуры) на водородное охрупчивание.....                                     | 21 |
| 1.2.4. Влияние концентрации сред на скорость коррозии<br>и склонность стали к хрупкому разрушению.....  | 23 |
| 1.3. Механизмы, теории и гипотезы хрупкого разрушения<br>при наводороживании в напряженном состоянии.....   | 27 |
| 1.3.1. Теория водородного охрупчивания.....   | 28 |
| 1.3.2. Теории, основанные на механизме хрупкого разрушения<br>Гриффитса.....  | 28 |
| 1.3.3. Теории, основанные на взаимодействии водорода с дислокациями... 29   |    |
| 1.3.4. Теория твердорастворного водородного упрочнения.....   | 30 |
| 1.3.5. Адсорбционно-электрохимическая гипотеза коррозии<br>под напряжением.....   | 32 |
| 1.4. Высокопрочные арматурные стали для предварительно напряженных<br>железобетонных конструкций и их стойкость<br>в условиях наводороживания.....                  | 34 |
| 1.4.1. Методы защиты и предупреждения хрупкого разрушения<br>высокопрочных арматурных сталей.....   | 40 |
| <b>ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ,<br/>МАТЕРИАЛЫ И УСТАНОВКИ</b> .....  | 44 |
| 2.1. Выбор метода исследования хрупкого разрушения металлов<br>и сплавов в напряженном состоянии при воздействии<br>агрессивных сред.....                           | 44 |
| 2.2. Установки и приспособления для определения длительной прочности<br>высокопрочных сталей в коррозионных средах.....   | 48 |
| 2.3. Методика и стали, принятые для исследования.....   | 54 |
| 2.4. Использование метода внутреннего трения для исследования влияния<br>водорода на субмикроструктурные изменения стали (микронаклеп в районе<br>коллекторов)..... | 61 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ<br/>ФАКТОРОВ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ<br/>ВЫСОКОПРОЧНЫХ АРМАТУРНЫХ СТАЛЕЙ .....</b>  | <b>66</b>  |
| 3.1. Влияние различных сред, концентрации, анодной и катодной поляризации<br>и температуры на механические свойства и длительную прочность — -<br>арматурной стали ..... | 66         |
| 3.1.1. Влияние среды, вызывающей наводороживание .....   | 78         |
| 3.1.2. Влияние растягивающих напряжений .....  | 79         |
| 3.1.3. Влияние среды и катодной поляризации .....  | 81         |
| 3.1.4. Влияние среды и напряжений .....  | 82         |
| 3.2. Влияние масштабного эффекта и состояния поверхности<br>на длительную прочность в среде, вызывающей наводороживание .....  | 97         |
| 3.3. Влияние уровня и способа создания растягивающих<br>напряжений на статическую водородную усталость .....   | 103        |
| <b>ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ<br/>И ЛЕГИРОВАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ СТАЛИ<br/>ПРОТИВ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ .....</b>                                | <b>114</b> |
| 4.1. Сравнительная стойкость против водородного охрупчивания<br>высокопрочной арматурной стали .....   | 114        |
| 4.2. Влияние легирования .....   | 119        |
| 4.3. Влияние видов и режимов термообработки .....  | 124        |
| 4.4. Опытнo-промышленное использование полученных<br>результатов .....   | 135        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>  | <b>139</b> |
| <b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>  | <b>143</b> |