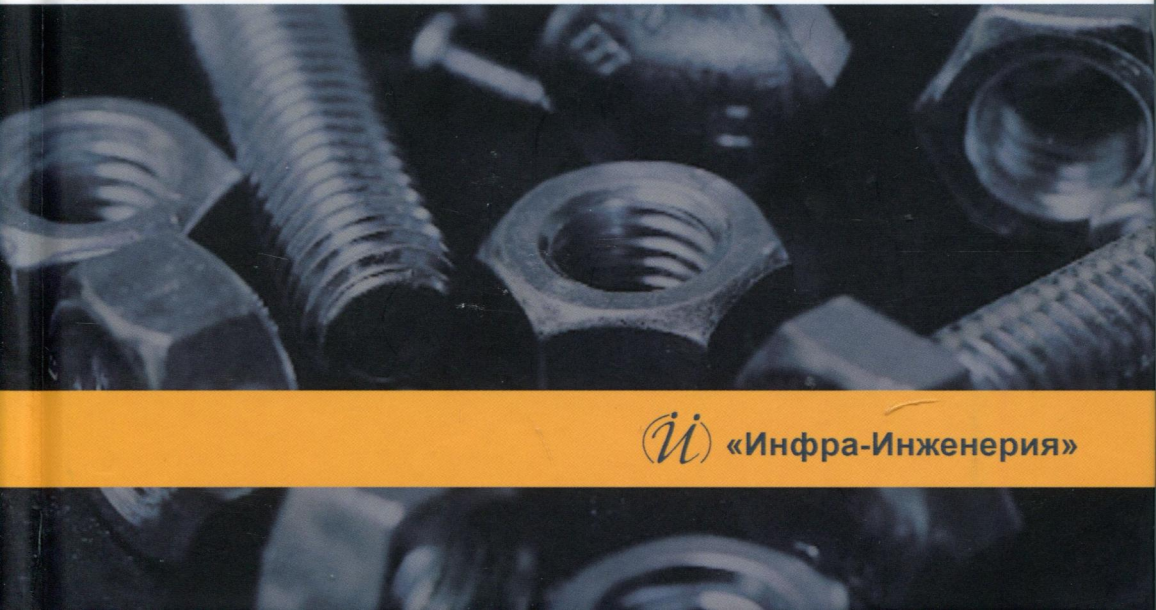


В. И. ГОРЫНИН

# ВЫСОКОПРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ



 «Инфра-Инженерия»

В. И. Горынин

# **ВЫСОКОПРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Монография

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2022

УДК 669:621.88.082  
ББК 34.41  
Г67

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *Ю. Л. Легостаев*;  
доктор технических наук *А. А. Ланин*

**Горынин, В. И.**

**Г67** Высокопрочные материалы для резьбовых соединений : монография / В. И. Горынин. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 432 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-0947-6

Представлены новые подходы к обоснованию технических требований к уровню сопротивляемости хрупким и циклическим разрушениям высокопрочных материалов для нагруженных резьбовых соединений. Проанализированы результаты испытаний натуральных и модельных резьбовых и фланцевых соединений из крепежных материалов в условиях нестационарного нагружения. Предложены и апробированы методы расчета концентрации и интенсивности напряжений и деформаций в резьбе крепежных деталей с учетом перераспределения нагрузки по виткам при малоциклового усталости соединения из материалов шпилек (болтов) с различными циклическими свойствами. Рассмотрены пути конструктивного и технологического совершенствования резьбовых соединений, обеспечивающие снижение влияния перераспределения нагрузки по виткам резьбы и, соответственно, повышение работоспособности резьбы при повторных затяжках соединения.

Рекомендуется инженерам и научным работникам, занятым в области металловедения, материаловедения не только для общего и энергетического машиностроения, но и судового, нефтехимического, автомобильно-тракторного, строительного и других отраслей машиностроения, а также студентам и аспирантам.

УДК 669:621.88.082  
ББК 34.41

ISBN 978-5-9729-0947-6

© Горынин В. И., 2022  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2022  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2022

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

ПРЕДИСЛОВИЕ	16
ВВЕДЕНИЕ	19
<i>Глава 1</i>	
МАТЕРИАЛЫ КРЕПЕЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБЩЕГО И АТОМНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ	28
1.1. Условия эксплуатации резьбовых соединений общего машиностроения и атомных энергетических установок	30
1.1.1. Крепежные детали водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР)	31
1.1.2. Крепежные детали реакторов на быстрых нейтронах (БН)	35
1.1.3. Технические требования к материалу крепежных деталей	38
1.2. Крепежные материалы отечественных и зарубежных атомных энергетических установок (АЭУ)	43
1.2.1. Материал болтов и шпилек	43
1.2.2. Материал гаек и шайб	52
1.2.3. Материалы корпусов реакторов	57
1.2.3.1. Корпуса РУ ВВЭР	57
1.2.3.2. Корпуса РУ БН	61
1.2.3.3. Малоактивируемые стали и сплавы	62
1.2.3.4. Малоактивируемые сплавы на основе титана для корпусов РУ ВВЭР	64
1.3. Перспективные титановые крепежные материалы	67
<i>Глава 2</i>	
СТАТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ РЕЗЬБОВОГО СОЕДИНЕНИЯ	75
2.1. Методы оценки прочности	75
2.1.1. Виды разрушения крепежных соединений	76
2.1.2. Прочность стержня шпильки (болта)	78
2.2. Влияние длины свинчивания на статическую прочность резьбового соединения крепежных деталей из сталей 38ХНЗМФА и 25Х1МФ	82
2.3. Испытания на статическое растяжение резьбового соединения М170	92

2.3.1. Схема нагружения	92
2.3.2. Определение деформаций	93
2.3.3. Обработка результатов измерений	95
2.4. Испытания на цепной срез витков резьбового соединения М170	100
2.4.1. Условия нагружения	100
2.4.2. Результаты экспериментов и их анализ	101
2.5. Расчетно-экспериментальная оценка прочности анкерно-тяжного резьбового соединения гильза-гайка для системы преднатяжения защитной оболочки энергоблока АЭС	105
2.5.1. Материал крепежа и методика испытаний	105
2.5.2. Работоспособность анкера тяжного с резьбой упорной усиленной 45°	107
2.5.3. Анализ прочности анкерно-тяжного соединения гильза-гайка с отклонениями по геометрии резьбы	113
2.5.3.1. Допускаемые напряжения	114
2.5.3.2. Расчет резьбы на смятие	114
 <b>Глава 3</b>	
КОЭФФИЦИЕНТЫ КОНЦЕНТРАЦИИ И ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ КРЕПЕЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ	118
3.1. Инженерный метод расчета коэффициентов концентрации напряжений	118
3.2. Коэффициенты интенсивности напряжений	131
3.3. Экспериментальная оценка расчетных значений упругого коэффициента концентрации напряжений и коэффициента интенсивности напряжений	138
 <b>Глава 4</b>	
СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ И ВЯЗКОМУ РАЗРУШЕНИЮ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КРЕПЕЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ	147
4.1. Химический состав и механические свойства отечественных и зарубежных крепежных сталей	147
4.2. Влияние структуры на сопротивление крепежных сталей хрупкому разрушению	149
4.2.1. Влияние температуры нагрева под закалку	149
4.2.2. Скорость охлаждения при закалке	150
4.2.3. Температурно-временные параметры отпуска	151
4.2.4. Совместное влияние химического состава	

и структуры на сопротивление Cr–Ni–Mo–V стали хрупкому разрушению	153
4.3. Крепежные стали различного уровня легирования и структурно-механического состояния 38ХНЗМФА и 25Х1МФ	156
4.3.1. Химический состав и служебные свойства	156
4.3.2. Моделирование структуры при закалке малых заготовок в различных охлаждающих средах	161
4.3.3. Термокинетические диаграммы и кривые охлаждения	164
4.4. Экспериментальные методы оценки сопротивляемости крепежных сталей хрупкому разрушению	167
4.4.1. Метод испытания падающим грузом	168
4.4.2. Метод испытания на ударную вязкость	170
4.4.3. Выбор и обоснование критерия оценки хладостойкости высокопрочных крепежных сталей	171
4.5. Выбор критериев и оценка трещиностойкости высокопрочных крепежных сталей	174
4.5.1. Диаграмма предельного состояния для тел с трещинами	174
4.5.2. Влияние различных факторов на трещиностойкость крепежных сталей при отрыве и продольном сдвиге	178
4.5.2.1. Трещиностойкость при отрыве	178
4.5.2.2. Влияние различных факторов на трещиностойкость крепежных сталей при продольном сдвиге	183
4.6. Структурные диаграммы сопротивляемости высокопрочных крепежных сталей 25Х1МФ и 38ХНЗМФА хрупким разрушениям	188
4.7. Расчетная оценка трещиностойкости резьбовых соединений	194
4.7.1. Обоснование выбора крепежного материала и геометрии резьбы	194
4.7.2. Расчет допустимых значений критической температуры хрупкости	199
4.8. Оценка допустимых значений критической температуры хрупкости с учетом уровня дефектности резьбового соединения и ударного образца	202

## **Глава 5**

СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ЦИКЛИЧЕСКОМУ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КРЕПЕЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ И ИХ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ	207
5.1. Методика испытания резьбовых соединений	207

5.2. Влияние температурного запаса по критической температуре хрупкости металла крепежа на сопротивляемость резьбового соединения малоциклового усталости	211
5.3. Влияние материала гайки на прочность резьбового соединения при малоциклового нагружении	215
5.4. Влияние масштабного фактора на сопротивляемость резьбового соединения «шпилька – гайка» малоциклового усталости	219
5.5. Влияние конструкции резьбового соединения	225
5.6. Влияние геометрии резьбы крепежных деталей на малоциклового усталость соединения	227
5.7. Влияние длины свинчивания крепежных деталей	235
5.8. Эмпирическое уравнение кривой усталости и диаграмма циклической прочности высокопрочных крепежных деталей с учетом малоциклового усталостного нагружения резьбового соединения	236
5.9. Инженерный метод оценки концентрации деформаций в резьбе крепежных деталей при малоциклового усталостном нагружении	242
5.9.1. Определение параметра $K(m)$	242
5.9.2. Расчетная оценка малоциклового усталости резьбовых соединений	250

## **Глава 6**

<b>ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ РАДИАЦИОННО-УПРОЧНЕННЫХ КРЕПЕЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ</b>	265
6.1. Механические свойства крепежных материалов ХН35ВТ и 08Х18Н10Т	266
6.1.1. Исходное состояние	266
6.1.2. Облученное состояние	270
6.1.3. Моделирование облученного состояния	273
6.2. Оценка остаточного ресурса радиационно-упрочненного металла крепежных деталей с учетом условий нагружения	282
6.3. Расчетно-экспериментальная оценка концентрации деформаций металла крепежных деталей с различным радиационным упрочнением при малоциклового усталостном нагружении резьбового соединения	289

## **Глава 7**

### **КОРРОЗИОННАЯ МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ РЕЗЬБОВОГО СОЕДИНЕНИЯ КРЕПЕЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

	296
7.1. Коррозионная повреждаемость крепежных деталей	296
7.2. Металлические аморфно-микросталлические покрытия, методы их получения и использования	298
7.3. Материалы и коррозионная стойкость исследуемых покрытий	306
7.4. Адгезионно-когезионная прочность аморфно-микросталлических никельфосфорных покрытий	311
7.5. Малоцикловая усталость крепежных деталей с антикоррозионными покрытиями	317
7.6. Коррозионно-усталостная прочность крепежных материалов после упрочнения (ионная имплантация покрытий из нитридов титана)	322
7.6.1. Усталостная прочность крепежной стали 18X11МНФБ (ЭП291) без покрытий и с покрытиями Ti/TiN и TiAlZrMo/TiAlZrMo-N	326
7.6.1.1. Методика испытаний	326
7.6.1.2. Результаты испытаний	327
7.6.2. Коррозионно-усталостная прочность стали ЭП291 с покрытиями Ti/TiN и TiAlZrMo/(TiAlZrMo)-N после стояночной коррозии в 1 % растворе NaCl	330
7.6.3. Коррозионно-усталостная прочность стали ЭП291 с покрытиями Ti / TiN и Ti Al Zr Mo/(Ti Al Zr Mo) – N после испытаний в паровой среде при температурах 470 и 560°С соответственно	332
7.6.3.1 Методика испытаний	332
7.6.3.2 Результаты испытаний	334
7.6.3.3 Результаты металлографии образцов с покрытиями после испытаний на усталостную прочность	336

## **Глава 8**

### **ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ТИТАНОВЫЕ КРЕПЕЖНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

	346
8.1. Кратковременные механические свойства металла титановых сплавов марки ВТ-16 и типа Ti-Al-Mo-Zr-Nb	348
8.2. Релаксационная стойкость крепежных титановых сплавов	352
8.2.1. Кольцевой образец	352



8.2.2. Резьбовое соединение	362
8.3. Трещиностойкость титановых сплавов BT-16 и типа Ti-Al-Mo-Zr-Nb	368
8.4. Влияние геометрии резьбы	372
8.5. Расчетно-экспериментальная оценка малоциклового долговечности	379
8.6. Влияние температуры испытаний	381
8.7. Влияние коррозионной паровой среды	384
8.8. Проектирование и изготовление титанового крепежа с учетом его усталостной прочности	386
<b>Глава 9</b>	
ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КРЕПЕЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ	389
9.1. Основные направления	389
9.2. Перспективное направление	403
9.2.1. Метод трансформации карбидно-цементитной фазы – фактор повышения сопротивляемости хрупкому разрушению крепежных сталей	405
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	410
ЛИТЕРАТУРА	411
SUMMARY	428