

ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора	4
Список сокращений и обозначений	5
Предисловие.....	7
Введение.....	16
Глава 1. Состояние материаловедческих исследований в области создания сталей для крупногабаритных заготовок изделий энергетического и атомного машиностроения	24
1.1. Стали для роторов паровых турбин. Основные задачи их создания и совершенствования	24
1.1.1. Условия работы роторов и предъявляемые требования к материалам.....	24
1.1.2. Определение основных направлений исследований в области разработки и совершенствования сталей для роторов паровых турбин, работающих в диапазоне температур 300–500 °С	28
1.2. Стали для корпусов атомных реакторов ледокольных и стационарных энергоустановок, применяемых в России и за рубежом, основные задачи в области их создания и совершенствования	31
1.2.1. Условия работы материалов корпусов реакторов различного назначения и требования, вытекающие из анализа условий их работы	31
1.2.2. Стали, применяемые для корпусов реакторов.....	33
1.2.3. Основные принципы выбора химического состава корпусных реакторных сталей. Перспективные направления совершенствования материалов	41
1.3. Оценка влияния основных факторов воздействия на получение свойств сталей для роторов паровых турбин и корпусов атомных реакторов.....	45
1.3.1. Основные направления оптимизации химического состава и режимов термической обработки сталей, применяемых для корпусов водо-водяных реакторов	45
1.3.2. Основные факторы, способствующие повышению сопротивления хрупкому разрушению и работоспособности роторных сталей	53

1.3.3. Свойства роторных сталей и оценка их работоспособности с использованием различных критериев.....	54
1.3.4. Факторы, влияющие на сопротивление радиационному и тепловому охрупчиванию реакторных сталей	56
1.3.5. Основные критерии оценки свойств реакторных материалов и возможность прогнозирования ресурса корпуса реактора с учетом деградации свойств металла корпуса в процессе эксплуатации.....	65
1.4. Основные подходы к разработке сталей для роторов паровых турбин и корпусов атомных водо-водяных реакторов различного назначения и оценке их работоспособности.....	67
1.4.1. Требования к разработке сталей энергетического назначения	67
1.4.2. Основные требования к технологии выплавки стали для крупных поковок энергетического машиностроения	68
1.4.3. Основные положения технологии проведения процессов ковки.....	69
1.4.4. Основные виды предварительной термической обработки (ПТО) крупных поковок из низколегированных марок стали. Принципы назначения предварительной термической обработки.....	71
1.4.5. Выбор режимов основной термической обработки заготовок для роторов и элементов корпусов реакторов	83
1.5. Постановка основных задач по исследованию и решению магистральных направлений совершенствования материалов и технологий	84
Глава 2. Опытные составы стали, методы исследования и испытаний.....	88
2.1. Обоснование базовых химических составов стали для исследования.....	88
2.2. Методы исследования структуры и фазово-структурных превращений, характеристики и свойства материалов.....	89
2.3. Методы исследования фазовых превращений конструкционных сталей и физико-механических свойств.....	90
2.3.1. Магнитометрия.....	91
2.3.2. ДюрOMETрия	93
2.3.3. Высокотемпературная металлография.....	94
2.3.4. Дилатометрия	97
2.3.5. Метод резистометрии	102
2.3.6. Термический анализ.....	103
2.3.7. Применение метода акустической эмиссии для исследования фазовых превращений в сталях и сплавах	104
2.3.8. Измерение плотности.....	105
2.3.9. Рентгенографическое определение характеристик тонкой структуры стали.....	106
2.3.10. Испытание на растяжение	107
2.3.11. Определение критической температуры хрупкости	107
2.3.12. Определение характеристик трещиностойкости на стадии зарождения и роста усталостных трещин	108

2.3.13. Проведение динамических испытаний материалов роторов и дисков паровых турбин	109
2.4. Разработки в области исследований микроструктуры, структурных и фазовых превращений, в том числе с использованием термомодеформационного воздействия в ходе исследований превращений	110
2.4.1. Исследование фазовых превращений с помощью дилатометра DIL 805.....	110
2.4.2. Имитационное моделирование на комплексе «GLEEBLE 3800».....	110
2.4.3. Метод дифракции обратно отраженных электронов (EBSD) на основе сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).....	111
Глава 3. Фазово-структурные превращения в стали бейнито-мартенситного класса Cr—Mo—V- и Cr—Ni—Mo—V-композиций.....	115
3.1. Влияние легирующих элементов на изменение критических точек при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении в конструкционных среднелегированных сталях для крупных поковок энергетического машиностроения	115
3.2. Превращения переохлажденного аустенита	124
3.2.1. Характер распада аустенита при непрерывном охлаждении и в изотермических условиях в бейнитной области	125
3.2.2. Мартенситное превращение в исследуемых составах стали и основные особенности его прохождения.....	133
3.2.3. Диффузионный распад аустенита в диапазоне подкритических температур. Особенности аустенито-перлитного превращения среднелегированных сталей в зависимости от содержания легирующих элементов.....	138
Выводы	145
Глава 4. Основные марки стали для роторов паровых турбин и корпусов реакторов АЭУ. Особенности технологии их производства.....	147
4.1. Основные требования к химическому составу стали для роторов паровых турбин и корпусов АЭУ различного назначения	147
4.1.1. Основные требования к стали для роторов и обоснование их состава с учетом назначения и условий работы.....	147
4.1.2. Основные требования к стали для корпусов реакторов АЭУ	152
4.1.3. Принципиальные основы легирования разрабатываемых марок стали с содержанием никеля до ~1,0 % и преемственность при их разработке.....	153
4.1.4. Выбор легирования стали для крупных роторов низкотемпературных паровых турбин с содержанием никеля около 4 %.....	158
4.1.5. Основные составы стали для роторов паровых турбин и корпусов реакторов АЭУ для промышленного освоения	199
4.2. Структурная наследственность в крупных стальных поковках.....	200
4.2.1. Особенности процессов рекристаллизации аустенитного зерна в процессе высокотемпературных нагретов.....	200

4.2.2. Особенности характера фазовых и структурных превращений в зависимости от устойчивости аустенита при распаде в диффузионной области	209
4.2.3. Аустенито-перлитное превращение в стали с малой устойчивостью аустенита в диффузионной области	219
4.2.4. Основные требования при проведении нагревов под ковку, предварительную и окончательную термическую обработку крупных поковок	222
4.2.5. Разработка базовых режимов предварительной термической обработки сталей различной склонности к структурной наследственности	226
4.3. Флоконочувствительность стали и основные принципиальные пути снижения содержания водорода в стали в процессе термической обработки	228
4.4. Основной характер структур, полученных при закалке крупногабаритных заготовок из стали различного уровня легирования	230
4.4.1. Термокинетические диаграммы распада аустенита исследуемых марок стали с пониженным содержанием никеля	230
4.4.2. Разработка оптимальных режимов окончательной термической обработки поковок из стали 20X2H4MВФА, 15X3HМФА, 15X2MФА и 15X2HМФА класса 0	242
4.5. Основные превращения при отпуске закаленной стали	258
4.6. Принципиальные подходы к назначению режимов отпуска	274
4.6.1. Выбор режима отпуска для цельнокованных роторов	274
4.6.2. Расчет температурных полей и напряжений при различных скоростях охлаждения заготовок роторов после проведения отпуска	275
4.6.3. Выбор режима отпуска для сварных роторов. Основные варианты	282
4.6.4. Расчет температурных полей и напряжений при местном отпуске сварного соединения ротора	284
4.6.5. Режимы отпуска для элементов корпусов реакторов и корпусов в сборе	290
4.6.6. Обоснование температуры подогрева при сварке хромоникельмолибденованадиевых сталей мартенситного класса	291
4.6.7. Ограничения в применимости сталей для различных конструкций	298
4.7. Основные принципиальные технологические процессы термической обработки, рекомендуемые для производства роторов и корпусов на стадии предварительной, окончательной и послесварочной термообработки	299
4.7.1. Рекомендуемые режимы предварительной термической обработки заготовок роторов и корпусов реакторов	299

4.7.2. Рекомендуемые режимы окончательной термической обработки заготовок роторов и корпусов реакторов	300
4.7.3. Рекомендуемые режимы термической обработки после сварки для сварных роторов и корпусов реакторов.....	301
Выводы	302
Глава 5. Влияние основных эксплуатационных факторов на изменение свойств металла роторов паровых турбин, турбин геотермального пара и корпусов атомных реакторов	307
5.1. Чувствительность к охрупчиванию корпусных реакторных и роторных марок сталей при длительных тепловых выдержках	307
5.1.1. Влияние различных факторов на тепловое охрупчивание	308
5.1.2. Склонность к тепловому охрупчиванию стали для корпусов водоохлаждаемых реакторов.....	316
5.1.3. Исследование склонности к тепловой хрупкости роторной стали 20X2H4MBФА	320
5.1.4. Оценка склонности к тепловой хрупкости теплоустойчивых марок стали Cr—Mo—V-композиции с содержанием никеля не выше 1,5 % и рекомендуемые области их применения	326
5.1.5. Оценка степени теплового охрупчивания стали для корпусов водоохлаждаемых реакторов на конец срока эксплуатации	329
5.2. Влияние легирующих элементов и примесей на сопротивление материала корпуса реактора радиационному охрупчиванию. Формирование основных критериев выбора стали для корпусов с различными условиями эксплуатации.....	332
5.3. Влияние коррозионной среды на склонность роторных материалов к разрушению	340
5.3.1. Влияние пароводяной среды на склонность роторной стали 20X2H4MBФА к зарождению усталостной трещины при условии малоциклового нагружения	340
5.3.2. Влияние среды геотермального пара на коррозионно-механические повреждения материалов роторов турбин ТЭС	343
Выводы	349
Глава 6. Промышленное освоение новых и усовершенствованных марок стали для роторов и корпусов реакторов АЭУ и оценка их основных характеристик	351
6.1. Основные направления исследований в подтверждение применимости разрабатываемых материалов	351
6.2. Принципиальные положения технологии производства металлургических полуфабрикатов из разработанных марок стали.....	352
6.2.1. Особенности технологии выплавки и разлива стали для роторов и корпусов реакторов АЭУ	352
6.2.2. Практика выполнения горячей пластической обработки заготовок роторов и элементов корпусов реакторов	356

6.2.3. Рекомендуемые режимы предварительной термической обработки и опыт их применения при производстве заготовок роторов и корпусов реакторов АЭУ	361
6.2.4. Рекомендуемые режимы окончательной термической обработки	366
6.3. Исследование качества роторов из стали марок 20Х2Н4МВФА, 20Х3НМФА, 24Х3МФА и 15Х3НМФА	367
6.3.1. Исследование механических свойств металла заготовок роторов	367
6.3.2. Оценка конструктивной прочности высокопрочной роторной стали 20Х2Н4МВФА	374
6.3.3. Оценка трещиностойкости роторной стали	375
6.3.4. Оценка условий нагружения конструкции сварного ротора	379
6.3.5. Оценка склонности стали 20Х2Н4МВФА к хрупкому разрушению методом разгонных испытаний	383
6.4. Исследование качества металла заготовок элементов корпусов реакторов из стали марок 15Х3НМФА-А, 15Х2МФА-А и 15Х2НМФА класса 0	389
6.4.1. Исследование механических свойств металла заготовок корпусов реакторов в полуфабрикатах различных сечений	389
6.4.2. Оценка трещиностойкости реакторных сталей на металле промышленного изготовления	404
Выводы	408
Глава 7. Перспективные направления и промышленное использование результатов работы	410
7.1. Принципиальная технология получения полых слитков для изготовления поковок типа обечаек для изделий ответственного назначения	410
7.2. Способ сварки заготовок из высокопрочных трудносвариваемых сталей	413
7.3. Способ изготовления корпусов атомных энергетических реакторов из разнородных сталей с целью повышения ресурса корпусов	417
7.4. Перспективные марки стали для изготовления корпусов реакторов нового поколения ВВЭР-1000, 1500 с ресурсом более 60 лет	420
Заключение и выводы	423
Литература	436
Об авторе	460