Каштанов Александр Дмитриевич. Разработка научно-технологических принципов выбора материалов с учетом особенностей их повреждения при эксплуатации различных элементов оборудования реакторов с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями.: диссертация ... доктора Технических наук: 05.16.01 / Каштанов Александр Дмитриевич;[Место защиты: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»], 2020

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ "ПРОМЕТЕЙ"

им. И.В.Горынина

Каштанов

Александр Дмитриевич

РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ

ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ

ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРОВ С ТЯЖЕЛЫМИ

ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

Специальность 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка

металлов и сплавов

Диссертация на соискание ученой степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург

2020 г.

Стр.

6

Глава I. Преимущества тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) при создании безопасных реакторов 18

1.1. Реакторы на быстрых нейтронах, решение энергетических потребностей

общества 18

1.2. Замкнутый топливный цикл 22

1.3. Преимущества реакторов с тяжелыми жидкометаллическими

теплоносителями 28

1.4. Создание детерминистически безопасных реакторов 34

1.5. БРЕСТ-ОД-300, СВБР-100 - современные проекты реакторных установок (РУ)

на быстрых нейтронах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями 37

1.6. Основные механизмы повреждения и разрушения конструкционных

материалов под воздействием тяжелых теплоносителей 45

1.7. Конструкционные материалы, применяемые для реакторных установок БРЕСТ-

ОД-300, СВБР-100 53

1.8. Постановка задачи исследования 58

Выводы по главе 1 59

Глава II. Совместимость конструкционных металлических материалов с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями 62

2.1. Предельные состояния основных элементов РУ и свойства, определяющие работоспособность конструкционных материалов в контакте с ТЖМТ 62

2.1.1. Сопротивление коррозии в потоке ТЖМТ 63

2.1.2. Механические свойства в контакте с ТЖМТ 67

2.1.3. Малоцикловая усталость в контакте с ТЖМТ 71

2.1.4. Сопротивление росту трещин (трещиностойкость) в контакте с

ТЖМТ 76

2.1.5. Ползучесть и длительная прочность в потоке ТЖМТ 89

2.2. Радиационная стойкость основных конструкционных материалов для корпусных и внутрикорпусных конструкций 101

2.3. Принципы выбора конструкционных материалов корпуса реактора, внутрикорпусных устройств (ВКУ) и теплообменного оборудования РУ с

ТЖМТ 121

Выводы по главе II 123

Глава III. Исследование влияния ТЖМТ на свойства конструкционных материалов

для изготовления РУ БРЕСТ-ОД-300, СВБР-100 125

3.1. Влияние потока теплоносителя на свойства конструкционных материалов

перспективных ЯЭУ 125

3.2. Коррозионная стойкость в потоке ТЖМТ 128

3.2.1. Создание испытательного оборудования и разработка методики

испытаний 128

3.2.2. Сопротивление коррозии в потоке ТЖМТ 132

3.3. Влияние потока теплоносителя на механические свойства 153

3.3.1. Методика испытаний 153

3.3.2. Кратковременные механические свойства конструкционных

материалов в контакте с ТЖМТ 154

3.4. Влияние теплоносителя на циклическую прочность конструкционных

материалов 156

3.4.1. Методика испытаний 156

3.4.2. Малоцикловая усталость конструкционных материалов в контакте с

ТЖМТ 157

3.5. Влияние теплоносителя на кинетику и механизм усталостного трещинообразования 165

3.5.1. Методика испытаний 165

3.5.2. Кинетика трещин конструкционных материалов в контакте с ТЖМТ

169

3.6. Исследование влияния потока теплоносителя на характеритстики ползучести и длительной прочности 180

3.6.1. Методика испытаний 180

3.6.2. Ползучесть и длительная прочность конструкционных материалов в

потоке ТЖМТ 182

Выводы по главе III 214

Глава IV. Модификация свойств поверхности как эффективный способ защиты материала от разрушения в условиях воздействия

ТЖМТ 216

4.1. Обоснование эффективности способа модификации поверхности 216

4.2. Определение требований к защитным покрытиям, оптимизация их состава и

методов нанесения 218

4.2.1. Выбор легирующих элементов 218

4.2.2. Влияние методов нанесения первичного покрытия 222

4.2.3. Влияние равномерности легирования Al по площади поверхности

первичного покрытия (применение планетарного механизма) 244

4.2.4. Влияние количества импульсов электронного пучка, применение

диафрагмы 253

4.2.5. Влияние подготовки поверхности 256

4.2.6. Влияние подогрева 257

4.2.6. Влияние толщины первичного покрытия 260

Выводы по главе IV 272

Глава V. Оценка повышения коррозионно-механических характеристик элементов реакторов из конструкционных материалов различных классов за счет модификации поверхности 274

5.1. Коррозионная стойкость образцов в потоке ТЖМТ 274

5.2. Стойкость образцов при термоциклировании 296

5.2.1. Методика испытаний 296

5.2.2. Термоциклическая прочность образцов с модифицированной

поверхностью 300

5.3. Циклическая прочность образцов в потоке ТЖМТ 313

5.4. Длительная прочность и ползучесть образцов в потоке ТЖМТ 325

5.5. Квазипластичность модифицированного слоя с учетом влияния теплоносителя

334

Выводы по главе V 340

Глава VI. Разработка перспективной стали для реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями на основе свинца 342

6.1. Обобщение данных по свойствам аустенитных кремнистых сталей марки 10Х15Н9С3Б1-Ш (ЭП302-Ш) и перспективной стали марки 04Х15Н11С3МТ

применительно к условиям РУ с ТЖМТ 342

Выводы по главе VI 366

Г лава VII. Обсуждение полученных результатов 368

Выводы по главе VII 393

Общие выводы 397

Библиографический список 401

Приложения 411

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. **На основе результатов экспериментально-теоретического анализа влияния условий эксплуатации реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями на структуру и свойства конструкционных сталей различных структурных классов сформулированы принципы выбора материалов для проектирования, оценки ресурса и изготовления энергетического оборудования. Исследованы и рекомендованы марки стали для изготовления разных узлов реакторной установки с учетом конкретных условий их эксплуатации: контакта с жидкометаллическим теплоносителем, температурного интервала, радиационной нагрузки.**
2. **Выявлены закономерности влияния температуры, уровня прочности и жесткости нагружения на структуру, кратковременные и длительные статические и циклические механические свойства конструкционных сталей разных классов в контакте с жидким свинцом.**
3. **Установлено, что контакт с жидким свинцом приводит к снижению циклической долговечности сталей аустенитного и ферритно-мартенситного классов. Показано, что скорость роста трещин в конструкционных сталях в условиях контакта с жидким свинцом зависит от температуры; изучен механизм и установлены факторы, определяющие этот процесс. Показана возможность самопроизвольного хрупкого разрушения сталей с объемно-центрированной кристаллической решеткой при циклическом нагружении.**
4. **Изучен механизм влияния жидкометаллического теплоносителя на скорость ползучести конструкционных сталей. Установлено, что контакт с тяжелым теплоносителем вызывает ускорение ползучести и снижение длительной прочности мартенситно-ферритных и аустенитных сталей по сравнению с поведением этих материалов на воздухе. Показано, что ускорение ползучести обусловлено разрушением защитной оксидной пленки и проникновением жидкого металла в сталь, что приводит к окислению границ зерен и жидкометаллической коррозии.**
5. Выявлена роль и установлено влияние концентрации кислорода в теплоносителе на характеристики ползучести и длительной прочности конструкционных сталей. Показано, что увеличение концентрации кислорода в теплоносителе способствует подавлению отрицательного влияния жидкого металла на длительные механические свойства сталей. При содержании кислорода в жидком металле> (3-4) х10-6 %, масс. характеристики ползучести стали при испытаниях в потоке теплоносителя и на воздухе становятся сопоставимыми по величине.
6. Установлено, что мартенситно-ферритная сталь марки 16Х12ВМСФБР-Ш (ЭП823-Ш) подвержена адсорбционному воздействию жидкометаллического теплоносителя, причем характер воздействия и, как следствие, механизм разрушения стали зависят от температуры теплоносителя. Показано, что при понижении температуры жидкого металла механизм разрушения стали изменяется с вязкого на хрупкий. При относительно низких температурах 360-420 °С образование и распространение трещин в стали происходит по типу хрупкого скола, что приводит к резкому снижению ее пластичности практически без снижения прочности. Это явление обусловлено эффектом Ребиндера. При температурах выше 450 °С этот эффект исчезает. Однако повышение температуры в этом случае приводит к появлению другого эффекта адсорбционного воздействия жидкометаллического теплоносителя: увеличения скорости ползучести, более раннем переходе в третью стадию ползучести и, как следствие, снижению длительной прочности по сравнению с испытаниями на воздухе. С повышением температуры и увеличением напряжений этот эффект усиливается.
7. Показано, что адсорбционное влияние жидкометаллического теплоносителя, вызывающее увеличение скорости ползучести, значительно слабее проявляется в аустенитных сталях по сравнению с ферритно-мартенситными. Так, при температуре 550 °С скорость ползучестиаустенитной стали марки 10Х15Н9С3Б-Ш (ЭП302-Ш) в потоке жидкого свинца возрастает в 2-3 раза, а для ферритно-мартенситной стали марки 16Х12ВМСФБР-Ш (ЭП823-Ш) - в 6-8 разпо сравнению с испытаниями на воздухе.
8. Впервые систематически изучены структура и эксплуатационные свойства новой марки стали 04Х15Н11С3МТ и ее сварочных материалов, являющихся результатом эволюционного развития стали марки 10Х15Н9С3Б1-Ш и ее сварочных материалов. Показано, что новые материалы обладают существенными эксплуатационными преимуществами по сравнению с традиционными конструкционными сталями и могут быть рекомендованы для изготовления узлов реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями на быстрых нейтронах.
9. Разработана и опробована технология модифицирования поверхности конструкционных сталей с использованием обработки электронным пучком предварительно нанесенного на нее металлического слоя. Предложенная технология обеспечивает насыщение поверхности стали алюминием и формирование защитного барьерного слоя из Al2O3, предотвращающего взаимодействие стали с жидкометаллическим теплоносителем. Толщина модифицированного слоя составляет 15-20 мкм, при этом стальная основа сохраняет исходные механические и технологические свойства. Технологический процесс включает две стадии: первая - нанесение на поверхность стали покрытия из Al или содержащей Al смеси; вторая - обработка поверхности стали мощным импульсным электронным пучком, обеспечивающая перемешивание материала покрытия с материалом основы, т.е. к формированию поверхностного слоя определенного состава.
10. Установлено, что модифицированный поверхностный слой (Fe+Al+Cr+Y) с последующей обработкой пучком электронов значительно уменьшает влияние теплоносителя свинец-висмут, понижая скорость ползучести ферритно­мартенситной стали 10Х9НСМФБ в контакте с жидким металлом. При этом результаты коррозионных испытаний показали отсутствие окисления стали при температурах до 650 °С.
11. Установлено, что модифицированный слой на поверхности стали, легированный 3-12 % (масс.) Al, при рабочих температурах 300-600 °С находится в квазипластическом состоянии. Величина квазипластичности модифицированного слоя на стали составляет 0,6-2,2 %. Построена температурная зависимость квазипластичности модифицированного слоя, температура перехода в хрупкое состояние материала покрытия составляет ~650°С.
12. **Установлено, что при температуре 500 °С циклическая прочность модифицированного слоя при испытаниях на малоцикловую усталость соответствует циклической прочности стали-основы. При понижении температуры до 360 °С наблюдается снижение циклической прочности ферритно-мартенситной стали без покрытия по сравнению со сталью с модифицированной поверхностью вследствие эффекта жидкометаллического охрупчивания.**

**Применение разработанной технологии для обработки поверхности труб парогенератора и оболочек ТВЭЛ значительно повышает работоспособность конструкционных сталей в потоке жидкометаллического теплоносителя. При этом может быть существенно повышена энергоэффективность реакторной установки за счет снижения термобарьеров вследствие обеспечения условий, исключающих рост оксидных пленок, и расширения диапазона допустимой концентрации кислорода в жидкометаллическом теплоносителе в сторону ее повышения. Это окажет положительное влияние на режимы работы установки, коррозионную стойкость внутриреакторного оборудования и частей парогенератора, контактирующих с теплоносителем**