Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Институт ядерной физики и технологий

Кафедра физических проблем материаловедения

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

**к курсовому проекту по дисциплине**

**"Физическое материаловедение"**

**на тему:**

**«РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛА АНТИДЕБРИЗНОГО ФИЛЬТРА РЕАКТОРА**

**ВВЭР-100»**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вариант № 7 |  |  | Группа Б16-103 |
| Выполнил студент |  |  | А. В. Хафизов |
| Научный руководитель | (подпись) |  | М.Г. Исаенкова |
| профессор  Преподаватель | (подпись) |  | А.Н. Сучков |
| доцент, к. т. н  Эксперт-метролог | (подпись) |  | Я.А. Бабич |
| инженер  Консультанты | (подпись) |  | А.Н. Сучков |
| доцент, к. т. н  профессор, д. ф-м. н. | (подпись) |  | В.Л. Якушин |
| доцент, к. т. н | (подпись) |  | А.В. Шульга |
| Заведующий кафедрой  профессор, д. ф-м. н. | (подпись) |  | Б.А. Калин |

(подпись)

Москва 2019 г.

**Введение**

Водо-водяной реактор ВВЭР является в настоящее время одной из самых распространенных ядерных энергетических установок во всем мире. ВВЭР имеет двухконтурную схему, где жидкость первого контура является теплоносителем тепловыделяющей сборки ТВС, а второй – содержит воду, пары которой непосредственно воздействуют на турбину. Со временем, под действием агрессивной среды, происходит эрозия металла и продуктов его коррозии с поверхности первого контура, что приводит к загрязнению воду в этом контуре. Эти загрязняющие вещества многократно циркулируют через ТВС и могут привести к засорению каналов, а также к повреждению поверхности ТВЭЛов.

Антидебризный фильтр является конструктивным элементом, который осуществляет фильтрацию жидкости теплоносителя от загрязнений. Очевидно, что материал фильтра должен иметь высокую коррозионную и радиационную стойкость в условиях жесткого нейтронного облучения, поэтому для эксплуатации данного элемента реактора необходим подбор оптимального состава материала с учетом всех эксплуатационных (высокой температуры, большого флюэнса облучения) и технологических требований (изготовление, способ крепления к ТВС).

**Целью работы является:** разработка материала антидебризного фильтра для ВВЭР-1000.

# **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К ПРОЕКТУ**

## **Условия работы материала**

Для выполнения курсового проекта в рамках дисциплины «Физическое материаловедение», было получено задание, представленное в таблице 1.1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вариант№ | Материал | Конструктивный элемент | Условия работы материала | | | | |
| Т,  °С | σр,  МПа | Среда | Флюенс нейтронов  1022н./см2 | Средняя энергия нейтронов  Е1, МэВ |
| 7 | Fe-Cr-Ni | Антидебризный фильтр | 320 | 190 | H2O | 7 | 1,9 |

Таблица 1.1 – Условия работы антидебризного фильтра

## **Описание конструктивного элемента**

Антидибризный фильтр (АДФ) служит для уменьшения числа отказов тепловыделяющих сборок (ТВС) реакторных установок из-за повреждения оболочек тепловыделяющих элементов (твэл) присутствующими в теплоносителе посторонними частицами (дебризом).

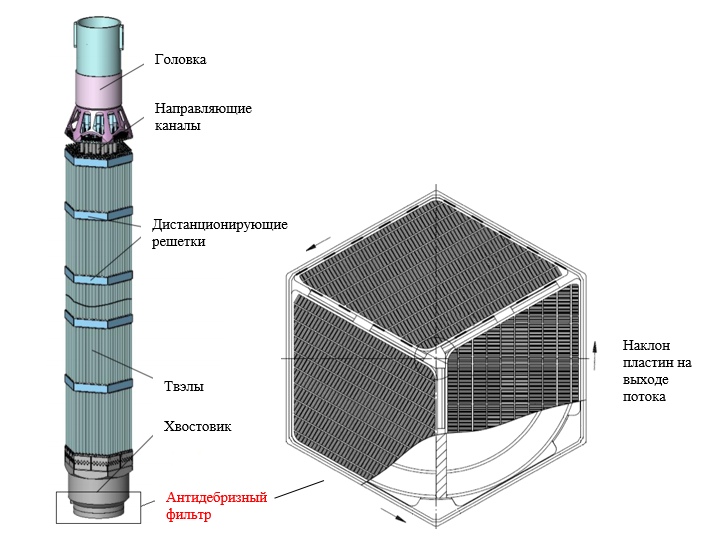
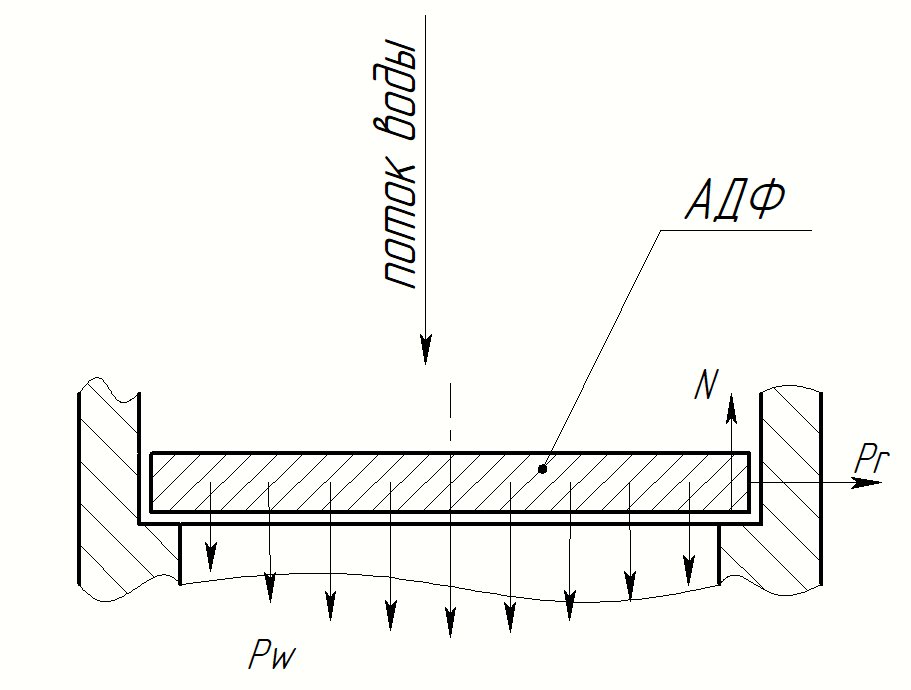


Рисунок 1.1 – Схема ТВС активной зоны ВВЭР-1000

АДФ выполняют из нескольких фильтрующих элементов пластинчатой конструкции с пазами для протока теплоносителя в форме вытянутых прямоугольников, наклоненных к оси ТВС в одной из двух взаимно перпендикулярных плоскостей под определенным углом, обеспечивающим отсутствие просвета фильтрующего элемента в направлении, параллельном оси тепловыделяющей сборки. На рисунке 1.1 изображена тепловыделяющая сборка ВВЭР-1000 и расположение в ней АДФ.

При эксплуатации АДФ испытывает на себе гидродинамическое давление в следствии циркуляции воды, а также соударения с дебриз-частицами. Также, учитвая что элемент находится под высоким радиационным облучением, возможна его деформация – распухание, которое будет являться причиной давления на стенки элементов трубопровода. Распределение действующих сил на антидебризный представлено на рисунке 1.2.



Pw – гидродинамическое давление создаваемое потоком воды, содержащим дебриз элементы; N – реакция опоры узла трубопровода; Pr – давление на узел трубопровода в следствие распухания материала

Рисунок 1.2 – Распределение давлений, действующих на элемент АДФ

* 1. **Характеристика основы**

Главным компонентом основы разрабатываемого материала является железо. Железо – химический элемент четвертого периода и побочной подгруппы VIII группы периодической системы. Атом железа содержит восемь валентных электронов, однако в соединениях железо обычно проявляет степени окисления (+2) и (+3), редко – (+6).

Железо – серебристо-белый, ковкий и пластичный тугоплавкий (т. пл. 1535°C, т. кип. 2870°C) металл, при температурах ниже 769°C обладает ферромагнетизмом. Материал существует в форме нескольких полиморфных (аллотропных) модификаций. При температурах ниже устойчиво железо с объемно-центрированной кристаллической решеткой - феррит (-Fe), в интервале температур – более плотная модификация аустенита с кубической гранецентрированной (), а выше этой температуры и вплоть до температуры плавления вновь становится устойчивой структура с объемно-центрированной ячейкой (δ-Fe).

Чистый никель – это пластичный, ковкий, химически малоактивный переходной металл серебристо-белого цвета. Этот металл имеет ГЦК структуру с параметром решетки a=3,524 Å и обладает ферромагнитными свойствами с точкой Кюри 358℃. Температура плавления никеля – 1453℃. Никель – довольно распространенный материал в природе, его содержание в земной коре составляет около 0.01 мас. %, однако в связи с трудностью технологии его получения, данный материал не является дешевым. Данный элемент широко используется в качестве легирующего в коррозионностойких сталях (68%), цветных сплавах (10%), а также при гальванизации изделий (9%) [1].

Хром является тяжелым тугоплавким металлом с температурой плавления 1875 ℃. Чистый хром пластичен, однако даже незначительные примеси кислорода и азота делают его хрупким и твердым материалом, имеющим низкую ударную вязкость. Хром так же, как и никель является элементом, использующимся для повышения коррозионной стойкость железа [2], но при этом является дешевым материалом. Хром имеет ОЦК структуру с параметром решетки a=2.885 Å.

Влияние хрома и никеля на структуру железа позволяет получать стали и сплавы различных классов. Хром оказывает влияние на коррозийную стойкость: наличие этого элемента более 12-13% увеличивает коррозийную стойкость железа. Никель, в свою очередь является причиной увеличения количества аустенитной фазы железа, которая усиливает прочностные свойства сплава [5] и его свариваемость [6] и, в отличие от ферритной фазы, упрочняется деформационной обработкой.

Система Fe-Cr-Ni является достаточно хорошо изученной. Диаграмма состояния этой системы изображена на рисунке 1.3.

Из рисунка 1.3 видно, что никель является аустенито-стабилизирующим химическим элементом, что является причиной повышения прочностных свойств сплавов и снижения их коррозионной стойкости. Никель также является компонентом сплава, который наиболее сильно снижает температуру хладноломкости Tхл (в небольших концентрациях) и увеличивает ударную вязкость, противодействия распространению трещин в сплавах железа [7], при этом, не ухудшая их технологичность. В больших концентрациях (более 3%), Ni приводит к негативным эффектам: снижению Tхл и к повышению хрупкости.

|  |  |
| --- | --- |
| а | б |

Рисунок 1.3 – Тройная диаграмма состояния Fe-Cr-Ni (а) [3] и ее изотермический срез при температуре 320 °С (б) [4]

Хром является феррито-стабилизирующим (зона на рисунке 1.3) элементом из-за изоморфности структур чистого Cr и и близких значениях параметров их кристаллических решеток. Это значит, что с целью сохранения аустенитной структуры с увеличением количества хрома в стали необходимо также увеличивать долю аустенито-стабилизирующих элементов: Ni, Mn. Положительным свойством легирования хромом является повышение коррозийной стойкости материала. Так, стали содержащие более 13% Cr называются коррозийно-стойкими и обладают высоким сопротивлением к окислению.

Учитывая, что в нашем случае необходимо наличие высокой коррозийной стойкости и жаропрочности одновременно, необходимо исключить содержание ферритной фазы в сплаве. Это можно сделать путем повышенного введения никеля (более 20-30%), что является неоптимальным в следствие высокой стоимости элемента.

Более выгодным решением будет являться использование закалки чистой аустенитной фазы с высоких температур, тогда можно ограничиться значительно меньшим добавлением никеля. Например, при температуре 650 °С изотермический срез ДС Fe-Cr-Ni будет иметь вид, представленный на рисунке 1.4, главным отличием которого от рисунка 1.3 является расширение области аустенитной фазы. Так, гамма-фаза теперь фиксируется при наличии никеля от 8-11%. После закалки эта аустенитная фаза может находится при рабочей температуре в метастабильном состоянии при добавлении соответствующих ЛЭ.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Рисунок 1.4 – Изотермический срез диаграммы железо-хром-никель при температуре 650 °С (сплошные линии) [8, 7]

Итак, приблизительный состав разрабатываемого сплава:

1. Железо – от 45% (нижняя граница для высоколегированной стали на основе железа [6])
2. Количество хрома находится в пределах от 15% до 20-30% для обеспечения приемлемых коррозионных и прочностных свойств.
3. Никель – от 8%

В настоящее время существует множество отечественных и зарубежных разработок сплавов из железа хрома и никеля. Рассмотрим, например, аустенитные стали марок 08Х18Н10 (зарубежный аналог – AISI 304), 08Х23Н13 (AISI 309S) и AISI 347. Составы данных сплавов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Состав аустенитных сталей разных марок. [9]

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| SAE | Аналог, Россия | Cr, % | Ni, % | C, % | Mn, % | Si, % | P, % | S, % | N. % |
| 304 | 08Х18Н10 | 18-20 | 8-10.50 | 0.08 | 2 | 0.75 | 0.045 | 0.03 | 0.1 |
| 309S | 08Х23Н13 | 22-24 | 12-15 | 1 | 0.045 | 0.03 | - |
| 347 | 08Х18Н12 | 17-19 | 9-13 | 0.75 | 0.045 | 0.030 | - |

Сталь 18-8 представляет собой низкоуглеродистую хромоникелевую сталь, проявляющую хорошую жаростойкость и коррозийную стойкость в жидких средах при высоких температурах. Это является главной причиной его использования в трубопроводных системах, турбинах парогенераторах и теплообменниках ядерных реакторов [10]. Ка видно из рисунка 1.3, сталь данного состава не может быть аустенитной в рабочих температурах без предварительной обработки. Сущность данной обработки состоит в продолжительном (время зависит от толщины изделия) отжиге при температуре 1038°С, когда сталь имеет чисто аустенитную структуру (рисунок 1.5), и последующей закалке в воду.

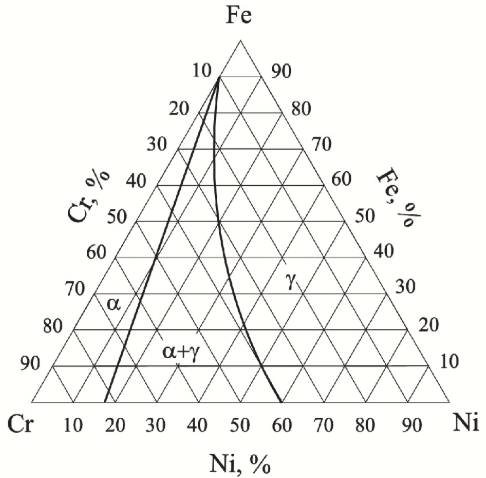


Рисунок 1.5 – Изотермический срез диаграммы железо-хром-никель при температуре 1100 °С (сплошные линии) [4]

Сплав 309S является эквивалентом 309 сплава, но с низким содержанием углерода с целью повышения свариваемости изделий. Низкое содержание углерода также обуславливает высокие технологические свойства, хорошую обрабатываемость. Сталь обладает коррозионной стойкостью в воде, жаростойкостью и жаропрочностью. Применяется в турбинах самолетов, нагревательных элементах, в изготовлении изделий трубопровода и ТВС ЯЭУ. Для получения аустенитной структуры стали данного состава, материал перед использованием подвергается предварительной закалке в воду с температуры 1083 °С[11].

AISI-347 отличается от остальных рассматриваемых сталей повышенным сопротивлением к межкристаллитной коррозии в широком диапазоне температур. Благодаря отличным жаропрочным свойства используется в трубопроводах высокого давления и водонагревателях, двигателях ракет и самолетов. Имеет хорошие сварочные свойства. Используется после закалки на воздухе с температуры 1093 °С [12].

Был проанализирован рынок предложений данных сталей, цены за прокатные листы из коррозионностойкой стали приведены в таблице 1.3. Сталь 08Х18Н10оказалась самой дешевой из рассматриваемых благодаря низкому содержанию ЛЭ.

Таблица 1.3. Цены на сортамент разных видов сталей на основании предложений [13], [14], [15]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Сталь | Сортамент | Цена, т.р. за тонну |
| 08Х18Н10 (304) | Лист 8х1000х2000 | 203.700 |
| 08Х23Н13 (309S) | Лист нержавеющий 8 мм ГОСТ 7350 | 390 000 |
| 08Х18Н12 (347) | Лист нержавеющий 2х1250х2500 мм | 218 000 |

Механические свойства сталей в зависимости от температуры приведены на рисунке 1.6. Из графиков видно, что прочностные свойства снижаются с ростом температур. На участке до 200 °С происходит интенсивное образование подвижных дислокаций, которые приводят к разупрочнению сплава. Участок от 200 до 500 °С характеризуется образованием карбидов хрома [17], которые препятствуют движению дислокаций и, следовательно, улучшают механические свойства, одновременно ухудшается коррозионная стойкость, так как возникает уменьшение концентрации свободного хрома вблизи границ зерен. При дальнейшем нагревании происходит растворение карбидов в матрице, подвижность дислокаций снова усиливается, и происходит стремительное разупрочнение.

Исходя из этих данных, при рабочей температуре (320℃), наилучшими жаропрочными характеристиками обладают стали 347 и 309S. Учитывая также, что сплав 347 обладает наилучшей твердостью и низкой ценой, этот сплав является оптимальным в качестве основы нашего разрабатываемого материала.

Стоит также отметить, что сталь 347 обладает также превосходными длительными характеристиками, которые представлены на рисунке 1.7. Из этой диаграммы видно, что длительная выдержка практически не влияет на прочность стали при температуре в зоне рабочих температур.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

Рисунок 1.6 – Жаропрочные характеристики сталей разных марок [11, 12, 16]

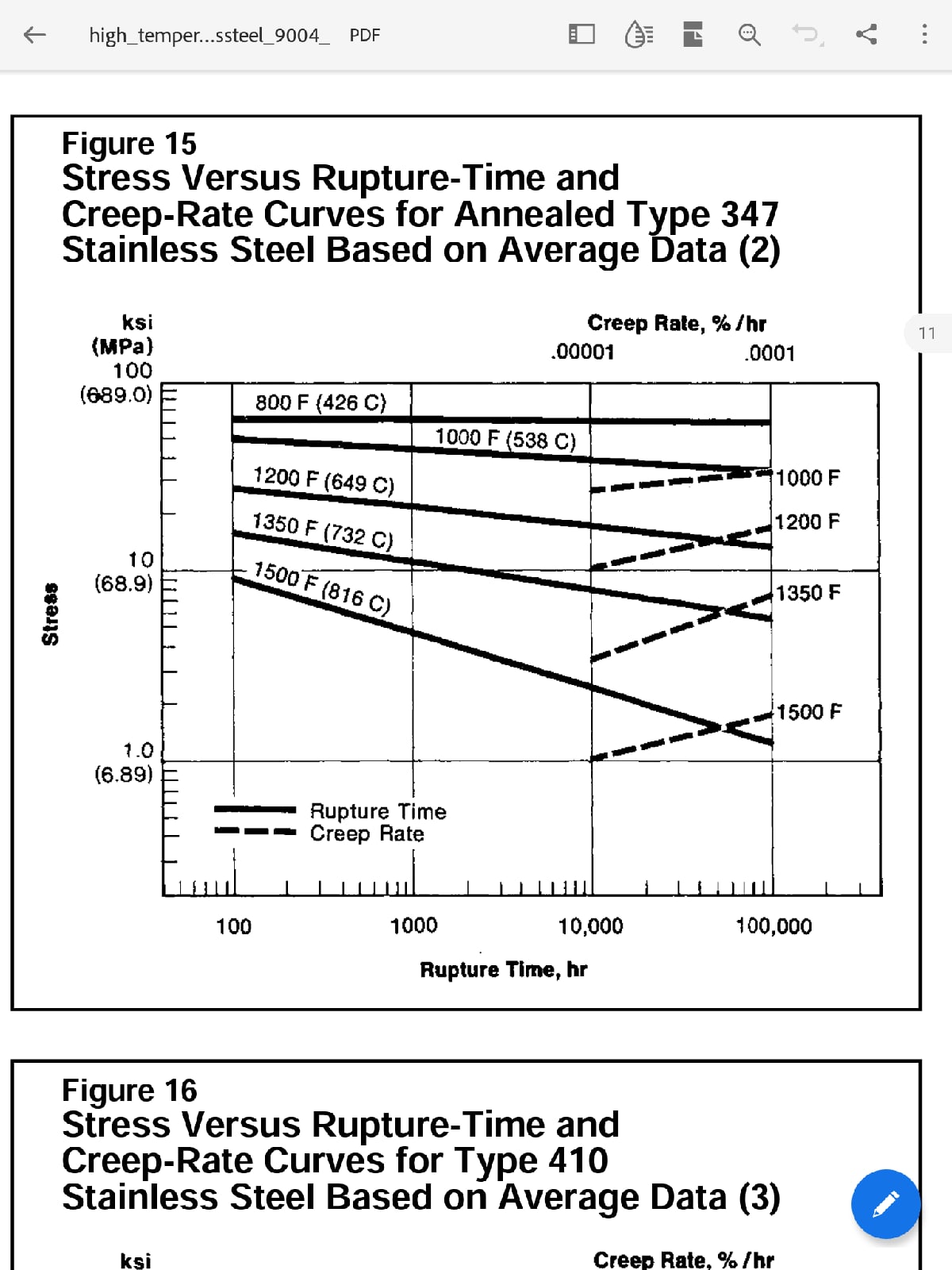


Рисунок 1.7. – Диаграмма длительной прочности стали 347 [16]

Таким образом, основой разрабатываемого сплава является сталь 347 с содержанием 12% Ni и 18% Cr главными достоинствами основы являются:

1. Длительная прочность
2. Коррозийная стойкость, особенно к МКК
3. Низкая стоимость

Возможны улучшения следующих свойств путем внедрения ЛЭ:

1. Прочность в диапазоне рабочих температур
2. Твердость

## **Характеристика теплоносителя**

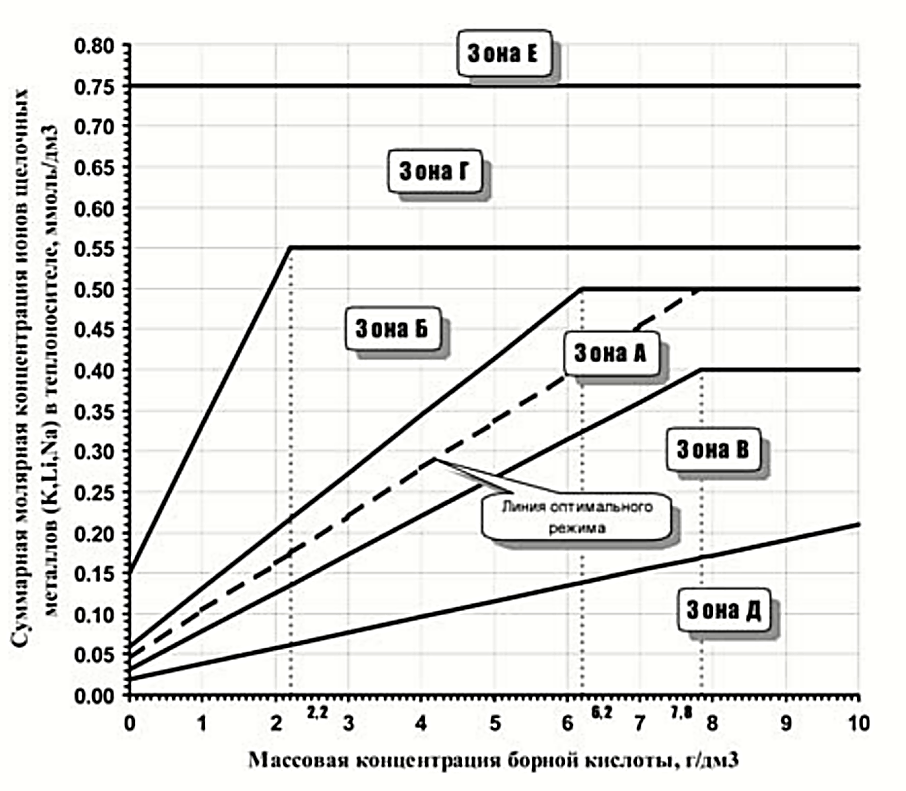
В процессе эксплуатации энергоблоков типа ВВЭР характеристики теплоносителя определяются стандартом организации (ОАО «Концерн Росэнергоатом») СТО 1.1.1.02.005.0004-2012 «Водно-химический режим первого контура энергоблоков атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. Нормы качества теплоносителя и средства их обеспечения». Основными, интересующими нас, задачами этого стандарта являются:

* подавление образования окислительных продуктов радиолиза при работе на мощности;
* обеспечение проектной коррозионной стойкости конструкционных материалов оборудования и трубопроводов в течение всего срока эксплуатации энергоблока;
* обеспечение минимального количества накоплений активированных продуктов коррозии;
* минимизация количества радиоактивных технологических отходов

В соответствие с этими требованиями, нормализуются показатели, представленные в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Нормализуемые показатели ВВЭР-1000 [18]

|  |  |
| --- | --- |
| Наименование показателей | Количество |
| Концентрация хлорид-иона, мг/дм3 | не более 0,1 |
| Концентрация растворенного кислорода, мг/дм3 | не более 0,005 |
| Концентрация растворенного водорода, мг/дм3 | 2,2 – 4,5 |
| Суммарная молярная концентрация ионов щелочных металлов (калия, лития, натрия) в зависимости от текущей концентрации борной кислоты | Зона А (рисунок 1.6) |



Зона А – область нормируемых значений; Зоны Б и В – области 1-го уровня отклонений; Зоны Г и Д – области 2-го уровня отклонений; Зона Е – область 3-го уровня отклонений.

Рисунок 1.6 – Зависимость суммарной молярной концентрации ионов щелочных металлов (калия, лития, натрия) в теплоносителе первого контура от текущей концентрации борной кислоты (энергоблоки АЭС с ВВЭР- 1000 России и зарубежные энергоблоки с РУ с ВВЭР-1000 российского производства) [18]

Концентрация растворенного водорода устанавливается из соображений коррозийной устойчивости конструкционных материалов активной зоны реактора. Исходя из таблицы 1.3 pH может изменяться от нижнего предела 5.9, который обуславливает увеличение сверх допустимых величин скорости водородного охрпчивания металла, до верхнего 10.3, превышение которого грозит коррозийным растрескиванием твэлов [19]. Помимо этого, концентрация водорода в пределах 2.2...4.5 мг/дм3 практически полностью подавляет радиолиз контурной воды и тем самым снижает коррозийное воздействие среды.

Необходимость поддержания определенного уровня хлорид-иона обуславливается тем, что он является сильнейшим активатором электрохимической коррозии. В сочетании с кислородом, даже небольшое количество хлорид ионов может вызвать коррозионное растрескивание материала разрабатываемого АДФ.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. "Nickel Use In Society". Nickel Institute. Archived from the original on September 21, 2017

2. Калин том 2

3. Cr-Fe-Ni Isothermal Section of Ternary Phase Diagram https://materials.springer.com/isp/phase-diagram/docs/c\_1100748 c\_1100748 (Springer-Verlag GmbH, Heidelberg, © 2016

3. Материалы в машиностроении. Т.3. Специальные стали и сплавы (1968) Под ред. И.В. Кудрявцева

4. Березовская В. В., Ишина Е. А., Озерец Н. Н. Диаграммы состояния тройных систем: учебное пособие. – 2016.

5. Beddoes, J. “Introduction to Stainless Steels”. In: Beddoes, J. Parr, J.G. (Edts.). “Introduction to stainless steels”. Materials Park, Ohio: ASM International. 1999

6. Davis, J “ASM Speciality Handbook: Stainless Steels”. Materials Park, Ohio: ASM International. 1994

7. Калин том 6

8. Weng F. et al. A novel strategy to fabricate thin 316L stainless steel rods by continuous directed energy deposition in Z direction //Additive Manufacturing. – 2019. – Т. 27. – С. 474-481.

9. ГОСТ 5949-75 - Сталь сортовая и калиброванная коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия

10. Llewellyn, D. Hudd, R. “Steels: Metallurgy and Applications”. 3rd edition. Boston: Butterworth Heinemann, 1998

11. Specification Sheet: Alloy 309/309S/309H (UNS S30900, S30908, S30909) W. Nr. 1.4833

12. Ludlum A. TECHNICAL DATA BLUE SHEET, Stainless Steels, types 321, 347 and 348 (Pittsburgh, PA: ATI Allegheny Ludlum Corp., 2003).

13. Магазин http://metabaz.promportal.su/goods/4540521/list-nerzhaveyuschiy-2h1250h2500-mm-12h18n10t-08h18n12

14. Магазин <https://moskva.tiu.ru/p398797614-list-nerzhaveyuschij-08h23n13.html>

15. Магазин <https://steel-ex.ru/nerzhaveyka/list-aisi-304-8/>

16. American Iron and Steel Institute, High-Temperature characteristics of stainless steels, A Designers’ Handbook Series N. 9004, Distributed by Nickel Development Institute

17. Tukur S. A. et al. Effect of heat treatment temperature on mechanical properties of the AISI 304 stainless steel //Intl J Innov Res Sci, Eng Technol. – 2014. – Т. 3. – С. 9516-9520.

18. Трегубова О. И., Брыков С. И., Сусакин С. Н. ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПЕРВОГО КОНТУРА ДЛЯ АЭС С ВВЭР-ТОИ.

19. Акимов А. М. ББК 31.47 А391.