|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | |
| **Национальный исследовательский ядерный университет**  **«МИФИ»** | | |
|  | | |
| Институт ядерной физики и технологий | | |
| Кафедра «Физические проблемы материаловедения» | | |
|  | | |
| ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ | | |
| на тему: | | |
| Разработка антидебризного фильтра для ВВЭР-1200  **Вариант 7** | | |
|  | | |
| Дипломник  (Студент группы Б16-103) |  | Хафизов А.В. |
|  |  |  |
| Научный руководитель  *(Профессор)* |  | Исаенкова М.Г. |
|  |  |  |
|  |  |  |
| Эксперт-метролог  инж., канд.техн.наук |  | Ананьин В.М. |
|  |  |  |
| Рецензент  *(должность, степень)* |  | Ф.И.О. |
|  |  |  |
| Заведующий кафедрой  проф., д-р физ.-мат. наук |  | Калин Б.А. |
|  | Москва 2020 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 жидкость, 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 жидкости в этом контуре. Эти загрязняющие вещества многократно циркулируют через ТВС и могут привести к засорению каналов, а также к повреждению ТВЭЛов.

Антидебризный фильтр является конструкционным элементом, размещенным на входе ТВС, 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 антидебризного фильтра для ВВЭР-1200.

# **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 |

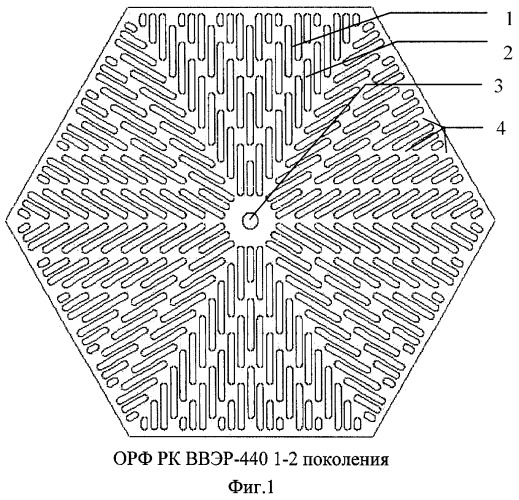
Таблица 1.1 – Условия работы антидебризного фильтра

## **Описание конструктивного элемента**

### **Описание изделия**

Основной задачей фильтра является очистка жидкости первого контура реактора от дебриз-предметов: мелкой загрязняющей субстанции, представляющей собой частицы конструкционных материалов ТВС, топлива и других отходов. Поэтому упрощенно фильтр можно представить как металлическую решетку, закрепленную на одном из концов ТВС.

Существует множество конструкций антидебризных фильтров, которые различаются в зависимости от страны изготовления и модели реактора [1..3]. Для реакторов типа ВВЭР антидебризный фильтр также является опорной решеткой [4], которая представлена на рисунке 1.1. Такая опорная решетка-фильтр (ОРФ) выполнена в виде перфорированной пластины с круглыми отверстиями, предназначенными для установки направляющих каналов или несущих труб и центральной трубы, и отверстиями для прохода теплоносителя. Каждое отверстие для прохода теплоносителя образовано двумя прямыми параллельными линиями и двумя дугами окружностей и имеет длину не более , где s - шаг твэлов в пучке. При этом в каждом секторе симметрии решетки отверстия для прохода теплоносителя параллельны друг другу и образуют между собой площадки, расположенные по правильной треугольной сетке с шагом s. Главным недостатком данной системы является «прозрачность» в направлении оси ТВС: она может пропускать цилиндрические debris-предметы диаметром, меньшим 2 мм, и плоские debris-предметы толщиной менее 2 мм и шириной до 20 мм практически любой длины.



1 — Перемычки между пазами шириной не менее 1 мм; 2 – Пазы шириной 2..2.2 мм; 3 – Отверстие для крепления центральной трубы (ЦТ): 4 – площадки размером 4..5 мм для упора ТВЭЛов

Рисунок 1.1 — Внешний вид антидебризной-опорной решетки фильтра ОРФ РК ВВЭР-440 1-2 поколения [4]

Более современный вариант ОРФ, который используется в реакторе ВВЭР-1200 представлен в патенте [5]. В данной модели опорная решетка-фильтр для тепловыделяющей сборки ядерного реактора выполнена в виде перфорированной пластины, имеющей в плане форму шестиугольника (рисунок 1.2 (а)), с круглыми отверстиями, предназначенными для установки направляющих каналов (НК) или несущих труб (НТ) и центральной трубы (ЦТ), с пазами для прохода теплоносителя и с опорными площадками для контакта с наконечниками тепловыделяющих элементов, расположенными по правильной треугольной сетке. Опорные площадки выполнены в форме круга, диаметром не более диаметра торца наконечника твэла. Пазы для прохода теплоносителя расположены равномерно в окружном направлении относительно центров каждого отверстия и опорных площадок в правильных шестигранных призмах, соосных с твэлами, НК (НТ) и ЦТ, с вписанным диаметром основания, равным шагу расположения твэлов, причем нижний край пазов смещен в окружном направлении на определенный угол до достижения непрозрачности решетки-фильтра в направлении оси ТВС, а часть паза на выходе теплоносителя из него параллельна оси ТВС.

Главной особенностью фильтра является форма проливных пазов лабиринтного типа, представленная на рисунке 1.2 (г). Каждый паз имеет форму ломаной прямой с углом 15°…25° и ширину не более 2 мм. Данные параметры являются оптимальными для обеспечения улучшенных фильтрационных свойств и низкого гидравлического сопротивления.

|  |  |
| --- | --- |
| а | б |
| в | г |

1 – опорные площадки; 2 – круглые отверстия предназначенные для установки НК или несущих труб; 3 – отверстие для установки ЦТ; 4 – пазы для прохода теплоносителя; 5 – правильная шестигранная призма, соосная с ТВЭЛ

Рисунок 1.2 — Общий вид ОРФ для ТВС ВВЭР-1200 (а), конфигурация предлагаемой ОРФ в районе отверстия под НК(НТ) и ЦТ (б), конфигурация предлагаемой ОРФ в районе опорной площадки под ТВЭЛ(в), форма проливных пазов ОРФ (г) [5]

### **Описание разрабатываемого конструкционного материала**

Проектируемое изделия должно работать в агрессивных средах и обладать следующими характеристиками:

1. Высокая радиационная стойкость. Элемент будет встроен в первый контур реактора вблизи ядерного топлива, что является причиной повышенной подверженности фильтра нейтронному облучению, возникающему в следствие деления нуклидов. Радиационные повреждения могут приводить к распуханию ОРФ или снижению прочностных характеристик.
2. Высокие прочностные характеристики. Изделие, помимо воздействия гидродинамических нагрузок, возникающих по причине высокой скорости циркулирования жидкости в активной зоне, подвергается статической нагрузке, создаваемой массой ТВЭЛов. В связи с высокими температурами нагрева теплоносителя, элементы фильтра должны также обладать приемлемой жаропрочностью.
3. Высокую коррозионную стойкость. В ВВЭР-1200 теплоносителем является вода. Присутствие в воде элементов, способствующих электрохимической коррозии (например, активаторов) или повышенная концентрация окислителей, а также дебриз-элементы и шлам приводят к коррозии металла ОРФ. Для обеспечения длительной работы ТВС, коррозия должна проходить максимально медленно.

### **Характеристика основы**

**1.3.1. Основные свойства железа**

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. Железо существует в форме нескольких полиморфных (аллотропных) модификаций. При температурах ниже устойчиво железо с объемно-центрированной кристаллической решеткой (-Fe), в интервале температур – более плотная модификация с кубической гранецентрированной (), а выше этой температуры и вплоть до температуры плавления вновь становится устойчивой структура с объемно-центрированной ячейкой (δ-Fe). Остальные физические и химические свойства приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Свойства никеля при комнатной температуре [6–9]

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристика | Значение |
| Номер в периодической таблице | 26 |
| Атомная масса, а.е.м | 55.845 а.е.м |
| Степени окисления | +2, +3, +6 |

Продолжение таблицы 1.2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Энергия дефектообразования кэВ | | 0.1 | |
| Сечение захвата тепловых нейтронов, | | 2.53 | |
| Параметр решетки, Ǻ | | -Fe | 2,86 |
| -Fe | 3.63 |
| δ-Fe | 2,86 |
| Атомный диаметр, Ǻ | | 1.26 | |
| Физико-химические свойства | | | |
| Стандартный электродный потенциал, В | | Fe2+ | -0.44 |
| Fe3+ | -0.036 |
| Физические свойства | | | |
| Плотность при н.у. ρ, г/см3 | | 7.874 | |
| Температура плавления, °С | | 1538,85 | |
| Удельная теплоёмкость Сp, кДж/(кг\*К) | | 0,45 | |
| Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м\*К) | | 80,4 | |
| КТР (Т=25°С) α ˑ10-6, 1/К | | 11,8 | |
| Механические свойства (Т=20 °С) | | | |
| Модуль сдвига G, ГПа | 77.5 | | |
| Модуль упругости E, ГПа | 200 | | |
| Предел прочности σв, МПа | 540 | | |
| Предел текучести σ0,2, МПа | 50 | | |

Главными достоинствами железа являются его широкая распространенность. Чистое железо – крайне пластичный и коррозийно-нестойкий материал, поэтому наиболее интересны для рассмотрения сплавы железа с углеродом (не более 2.14%) и легирующими элементами (не более 2.5%), которые называются сталями. Образование карбидов значительно улучшают механические свойства железа в широком диапазоне температур. Примером может являться реакторная сталь ВВЭР-ТОИ – 15Х2НМФА, характеристики которой приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Механические свойства стали 15Х2НМФА при комнатной температуре [11]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Характеристика | Значение | |
| Модуль сдвига G, ГПа | Не могу найти | Не могу найти |
| Модуль упругости E, ГПа | 215 | 195 |
| Предел прочности σв, МПа | 610 | 539 |
| Предел текучести σ0,2, МПа | 490 | 441 |

Высокие прочностные характеристики, коррозийная стойкость и распространенность исходных материалов легированных сталей позволяют изготавливать из нее конструкции различных изделий: корпуса ядерных реакторов, несущие элементы ТВС, трубы теплоносителей.

Относительно высокое сечение захвата тепловых нейтронов железа делает невыгодным его применение в качестве материала элементов ТВЭЛ, однако в некоторых типах реакторов, таких как PWR, использование сталей в качестве оболочек ТВЭЛов может быть оправдано высокой жаростойкостью [12].

**1.3.2. Влияние никеля на характеристики сталей**

Чистый никель – это пластичный, ковкий, химически малоактивный переходной металл серебристо-белого цвета. Этот металл имеет ГЦК структуру с параметром решетки a=3,52 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%) [13].

В сталях никель является легирующим элементом, который способствует образованию и сохранению аустенита, что отражено на диаграмме Шеффлера (рисунок 1.3). Легированный аустенит является основной составляющей многих коррозионностойких, жаропрочных и немагнитных сплавов. Он легко наклепывается, то есть быстро и сильно упрочняется под действием холодной деформации. [14]

Никель увеличивает прокаливаемость стали: способность стали приобретать мартенситную или троосто-мартенситную структуру на определенную глубину при закалке [14]. Это повышает твердость поверхности изделия, что необходимо в особенности при изготовлении антидебризных фильтров для уменьшения коррозийной эррозии.

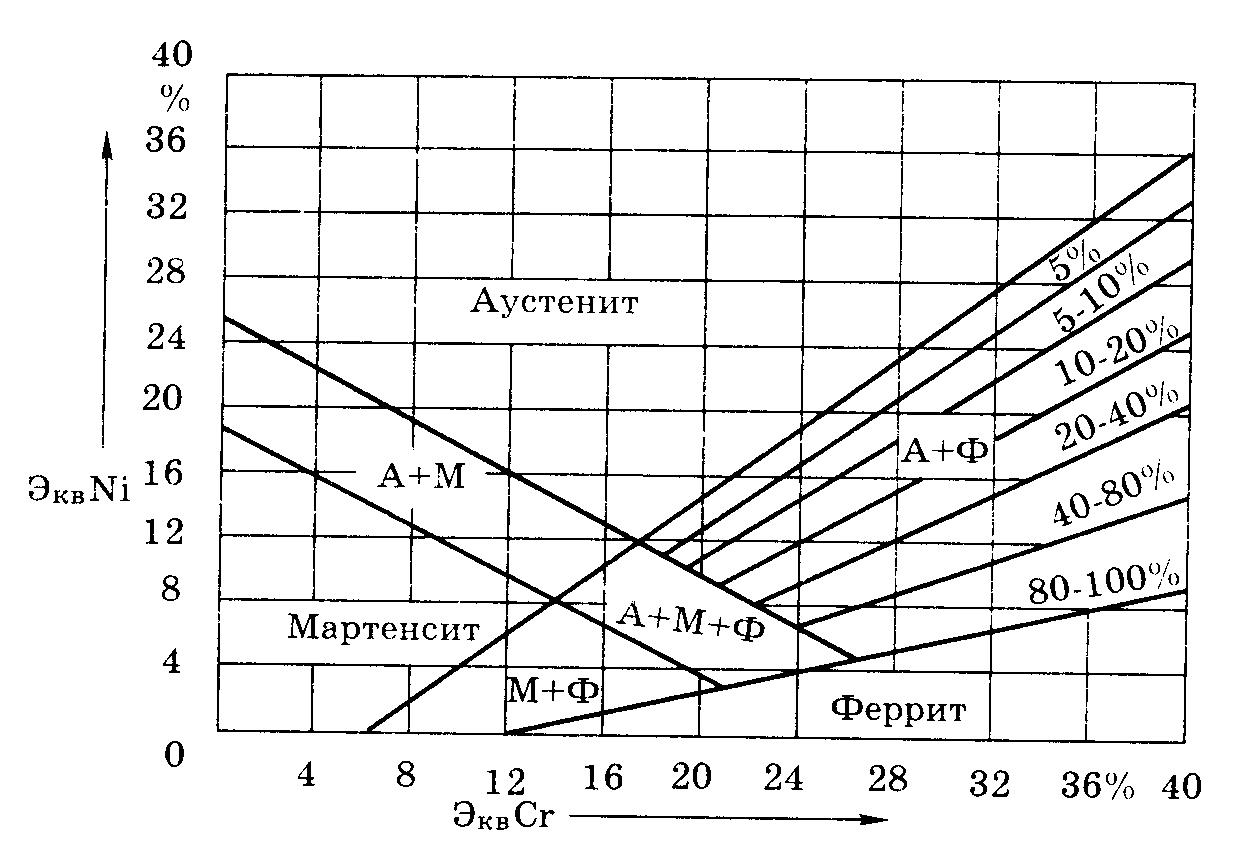


Рисунок 1.3 — Диаграмма Шеффлера

Помимо прочностных, никель также влияет на технологические свойства. Содержание Ni в пределах 8-10% обеспечивает стали хорошую пластичность и формировочные свойства, улучшает свариваемость и увеличивает сопротивление стали к коррозии в районе сварного шва [15].

**1.3.3. Влияние хрома на характеристики сталей**

Другой ЛЭ – Cr 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, повышающим коррозионную стойкость сталей [9]. Хром имеет большое сродство к кислороду и поэтому сильно повышает жаростойкость стали, образовывая на ее поверхности оксидную пленку, которая препятствует дальнейшей диффузии атомов кислорода в сталь. При гомогенной структуре сплава, Cr снижает электрохимическую коррозию, так как он является более благородным элементом чем железо и по правилу Таммана (см. рисунок 1.3) препятствует выходу атомов железа через границу фаз анод-жидкость. Хром является дешевым материалом.

Добавка хрома повышает механические свойства: прочность и твердость стали при высоких температурах. Это проиллюстрировано зависимостью на рисунке 1.4.

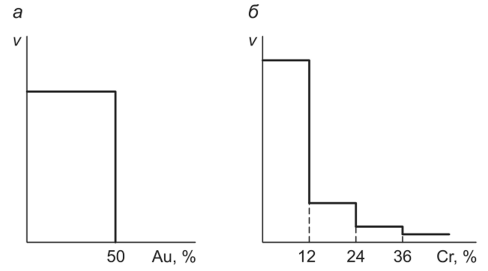


Рисунок 1.3 — Влияние количества хрома в сплаве Fe-Cr на скорость коррозии [9]

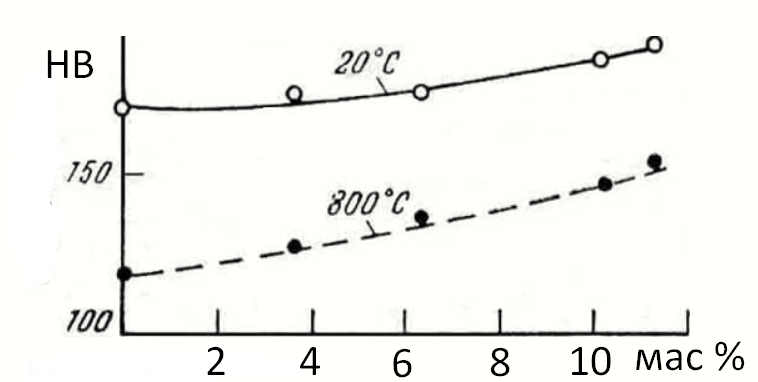


Рисунок 1.4 — Влияние количества хрома на твердость аустенитных сталей

**1.3.4. Обоснование состава сложной основы**

ВВЭР-1200 работает при температуре активной зоны 298.2℃ на входе и 328.6℃ на выходе [17], это значит что материал опорной решетки-фильтра, как уже указывалось выше, должен обладать высокой жаропрочностью и коррозионной стойкостью, чтобы выдержать гидродинамическую нагрузку.

Для выполнения прочностных требований необходимо обеспечивать высокую прокаливемость материала изделия, которая обеспечит однородность СФС и механических свойств, иначе ,при низкой прокаливаемости, в центре детали будет проявляться перлитная структура, которая приводит к снижению прочности и ударной вязкости. Для обеспечения прокаливаемости выбран дешевый элемент – хром и дорогой – никель. Из рисунка 1.5 видно, что сочетание хрома и никеля приводит к увеличению твердости, ударной вязкости и температуру хрупко-вязкого перехода феррита, что и требуется в техническом задании.

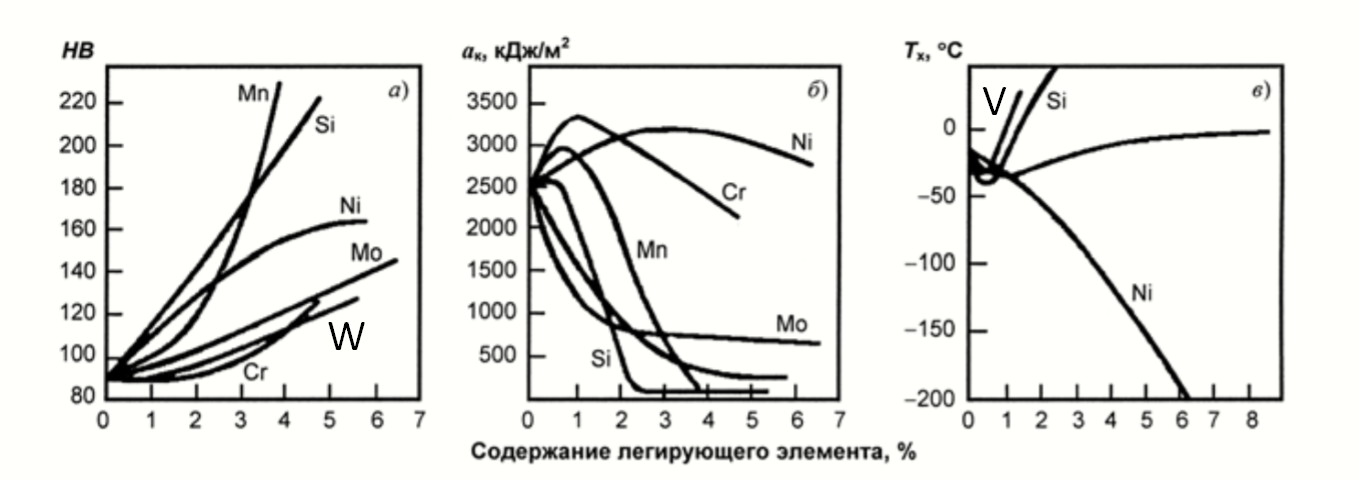
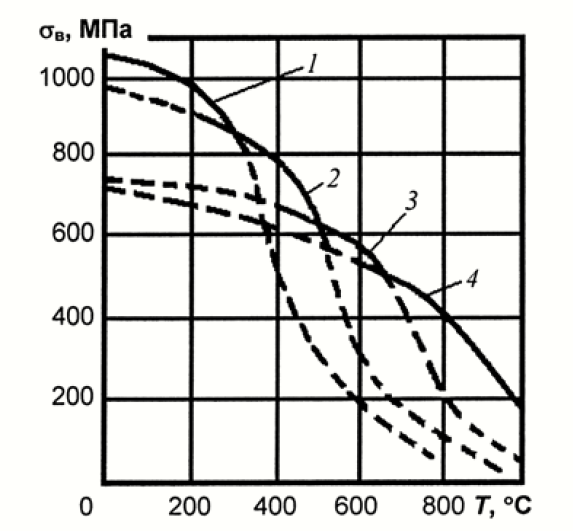


Рисунок 1.5 — Влияние легирующих элементов на твердость (а), ударную вязкость (б) и температуру хрупко-вязкого перехода (в) феррита [18]

С учетом диапазона рабочих температур, из рисунка 1.6 очевидно, что достаточно лишь небольшое количество легирующих элементов для обеспечения большого предела прочности.



1 − простые конструкционные стали (углеродистые улучшаемые, слаболегированные Cr-Ni-стали); 2 − сравнительно слаболегированные стали перлитного и ферритного классов (теплоустойчивые стали); 3 − аустенитные жаропрочные стали; 4 − высоколегированные жаропрочные стали со специальным упрочнением и никелевые сплавы

Рисунок 1.6 — Предел прочности различных материалов в зависимости от температуры

Как уже описывалось в пункте 1.3.3, хром является элементом, замедляющим коррозию стали. Стоит также учитывать, что помимо высокого сродства к кислороду хром является карбидообразующим элементом и выделение карбида хрома по границам зерен может привести к межкристаллитной коррозии и, как следствие, охрупчиванию металла. Для предотвращения этого процесса необходимо также внедрение ЛЭ-стабилизатор, который будет иметь большее сродство к углероду.

Также, недостатком данного материала может быть подверженность распуханию и радиационному росту в следствие облучение нейтронами. Однако в разделе 1.3.1 указывалось, что железо обладает малым сечением захвата нейтронов, а с учетом того, что примеси никеля и хрома будут небольшими, радиационное воздействие не должно оказывать существенного влияние на форму детали.

* 1. **Характеристика теплоносителя**

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Riordan III, John E. "Nuclear fuel assembly debris filter." U.S. Patent No. 5,094,802. 10 Mar. 1992.

2. DeMario, Edmund E. "Nuclear fuel assembly debris resistant bottom nozzle." U.S. Patent No. 4,828,791. 9 May 1989.

3. Proebstle, Richard A., and Bruce Matzner. "Lower tie plate debris catcher for a nuclear reactor." U.S. Patent No. 5,519,745. 21 May 1996.

4. Опорная решетка-фильтр для тепловыделяющей сборки ядерного реактора: пат. 2 264 666 C2 USA. Россия // Кострицын В.А. и др.; заявл: 2010.08.12; опубл: 2012.04.10 Открытое акционерное общество "Машиностроительный завод" (RU)

5. Опорная решетка-фильтр для тепловыделяющей сборки ядерного реактора 2 639 716 https://yandex.ru/patents/doc/RU2639716C1\_20171222

6. Meija, Juris; et al. (2016). "Atomic weights of the elements 2013 (IUPAC Technical Report)". Pure and Applied Chemistry. 88 (3): 265–91. doi:10.1515/pac-2015-0305

7. Callister, "Materials Science and Engineering," Wiley (1997)

8. Stoller, Roger E. "The role of cascade energy and temperature in primary defect formation in iron." Journal of nuclear materials 276.1-3 (2000): 22-32.

9. Калин том 2

10. Iron (Fe) - Properties, Applications https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9094#

11. Марков С. И., Дурынин В. А., Мохов В. А. Сталь марок 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А и 15Х2НМФА класс 1 для корпуса реактора проекта ВВЭР-ТОИ //Тяжелое машиностроение. – 2013. – №. 3. – С. 2-5.

12. Колпаков Г. Н., Селиваникова О. В. Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов. – 2009.

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

14. Влияние легирующих элементов на свойства стали и сплавов https://tochmeh.ru/info/lego.php

15 Каховский Н. И. Сварка нержавеющих сталей. – Рипол Классик, 2013.

16 Влияние легирующих элементов на жаропрочность аустенитных сталей <https://ooo-novstal.ru/spravka/vliyanie_legiruyuwih_elemetov.html>

17 Асмолов В. Г. и др. ГОЛОВНОЙ БЛОК НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ–ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТА ВВЭР-1200.

18 Калин 6