## Лекция 5 Корпуса реакторов





Микрофотографии поверхностей разрушения с изломов материалов корпусов реакторов ВВЭР-440 (a) [26] и ВЕЭР-1000 (б). Хрупкое межзеренное разрушение.





Типичные участки излома образцоз с вязким межзеренным характером разрушения



Температуза испытания

Схематическая диаграмма, иллюстрирующая упрочняющий и неупрочняющий механизмы радиационного охрупчивания.

### Хрупкое и вязкое разрушение



Диаграмма растяжения (нагрузка - перемещение)

#### Концепция механики разрушения



### Обобщенные категории механики

#### разрушения для тел, имеющих трещину



LEFM Линейно-упругая механика разрушения

Локализованное течение у вершины трещины

ЕРҒМ Упруго-пластическая механика разрушения

Течение в фактическом сечении неразрушенного материала

НТТDFM Высокотемпературная функционально зависящая от времени механика разрушения

Течение материала во всем сечении

### Основополагающие принципы линейно-

#### упругой механики разрушения



К - коэффициент интенсивности напряжений, в единицах MPa\*m<sup>1/2</sup>

Величина интенсивности упругих напряжений в области вершины трещины может быть описана однозначно параметром К.

К зависит от:

- Величины приженной извне нагрузки - σ

- Длины трещины - а

- Геометрии тела, имеющего трещину, и метода приложения нагрузки - Z

 $K = f(\sigma^* Z^* a^{1/2})$ 

ЗАРОЖДЕНИЕ ТРЕЩИНЫ ИМЕЕТ МЕСТО, ЕСЛИ:

 $K > K_{1c}$ 

(концентрация приложенных) > (вязкость материала) напряжений



Различные моды образования трещины (I - мода раскрытия трещины, II - мода скольжения, III - мода сдвига)



Схематическое изображение трещины, подвергнутой I моде нагружения, демонстрирующее линейно-упругое распределение локального напряжения растяжения (σ<sub>уу</sub>) непосредственно перед трещиной

### Схема определения срока службы КР



## Схема определения сдвига Т<sub>к</sub> по ударным

#### испытаниям



## **Phosphorus basic influence**

∆ T41J / ∆ yield vs. Fluence



Lack of non-hardening embrittlement (grain boundaries segregation)



Change in the transition temperature and yield strength of the: (a) 15Kh2MFA base metal and (b) 10KhMFT weld material as  $\uparrow$  function of neutron fluence (E > 0.5 MeV).



Finence depender ce of Charpy shift and yield strer ...d. 'r crease for 'silicor-ki'led mild steel: comparison with root fluence dependence [40].







Fig. 2. Plot of yield stress change (MFa) versus (a) irradiar in fluence and (b) dpa.



Table	1. N	Aaterials	of	ESTEREL	program
-------	------	-----------	----	---------	---------

	Cu	Р.	Ni
Material M1	0.048 %	0.008 %	0.76 %
Material M2	0.095 %	0.020 %	0 68 %

#### Table 4. Relative fluence response

Response	0.01 - 0.1 MeV	0.1 - 1 MeV	>.I MeV	TOTAL
<pre>o &gt; 1 + OSIRIS SILOE</pre>	0	0 0	100 % 100 %	100 % 100 %
<pre></pre>	0	59 % 81 %	41 % 19 %	10Ò % 100 %
dpa <sup> </sup> OSIRIS SILOE	3 % 8 %	26 % 57 %	71 % 35 %	100 % 100 %

#### Table 7. Difference in embrittlement at the same fluence

	Difference OSIRIS-SILOE		Difference OSIRIS-SILOE
same dpa M1 M2	+ 5°C + 9°C	same Φ > 1 MeV M1 M2	- 2°C 0

Table 8. Embrittlement percentage in 2 energy groups

ſ	0,1 - 1	MeV	> 1 MeV		
Ī	OSIRIS	SILQE	OSIRIS	SILOF	
MI	4 %	12 %	96 %	88 %	
M2	0	0	100 %	100 %	



Fig. 1. Steel block in SILOE

#### <u>«Флакс»</u>



Поток нейтронов на ОС в 10-20 раз выше чем на внутренней поверхности стенки КР Контейнер **OC** Стенка

корпуса реактора Шахта

## **T.Williams**



#### Cu precipitates increase faster with low flux

## C.English, T.Williams et al.

## J Value in Relation to the Plateau

![](_page_23_Figure_2.jpeg)

-Cu contribution (plateau) does not depend on flux value

- -Cu hardening kinetic depends on flux
- Cu hardening goes on faster with low flux

## *P*-value=0.61>0.05

![](_page_24_Figure_1.jpeg)

![](_page_25_Figure_0.jpeg)

# Эффект флакса зависит от содержания Си в материале. Положительный эффект при содержании Си больше~0.10 %

![](_page_26_Figure_1.jpeg)

![](_page_27_Figure_0.jpeg)

Сравнение материалов корпусов реакторов "западного" (стали, использующиеся в США) и "восточного" (стали, разработанные в бывшем СССР) типов. На рис. приведены отношения средних содержаний элементов в соответствующих марках сталей.

Chemical composition of 25Cr3NiMo steel as compared with A533B1, 15Cr2MoV, 15Cr2NiMoV and 15Cr3NiMoV steels

Material	С	Mn	Si	S	Р	Мо	Ni	Cr	Cu	V
25Cr3NiMo	0,24	0,49	0,28	0,040	0,018	0,40	1,07	3,30	0,10	0,03
A533B1	0,18	1,49	0,27	0,004	0,02	0,55	0,84	0,15	0,16	0,01
15Cr2MoV-A	0,11  0,21	1),3 	0,17  0,37	≤ 0,025	≤ 0,025	0,6	≤0,4	2,0	≈0,15	0,25  0,35
15Cr2NiMoV-A	0,13	0,3	0,17	≤ 0,020	≤ 0,020	0,5	1,0  1,5	1,8  2,3	≤0,30	0,10
15Cr2MoV-AA	0,11  0,16	0,3	0,17	≤ 0,015	≤ ດ,012	0,6	≤0,4	2,0	≤0,10	0,25  0,35
15Cr2NiMoV-AA	0,13  0,18	0,3	0,17  0,37	≤ 0,012	≤ 0,010	0,5	1,0 1,5	1,8	≤0,08	0,10
15Cr3NiMoV	0,12	0,3	0,17	≤ 0,020	≤ 0,020	0,5  0,8	0,8	1,8 2,3	≤0,20	0,08

## Главная задача – определение физического ресурса материалов корпусов реакторов

![](_page_29_Figure_1.jpeg)

![](_page_30_Figure_0.jpeg)

Сравнение диалазонов изменения фосфора (3) мещи (6) и никеля (в) в метелле сварных швов корпусоз ВВЭР-440/230, ВВЭР-440/213 и ВВЭР-1000.

## Закономерности охрупчивания материалов корпусов ВВЭР-440

![](_page_31_Figure_1.jpeg)

Сварной шов: ΔT<sub>к</sub>= 800×(P+0.07×Cu) × (F×10<sup>-18</sup>)<sup>1/3</sup> (см<sup>-2</sup>) Основной металл: ΔT<sub>к</sub>= 18×(F×10<sup>-18</sup>)<sup>1/3</sup> (см<sup>-2</sup>)

## Кризис середины 80х годов

 К середине 80х годов охрупчивание материала корпусов реакторов ВВЭР-440 первых поколений достигло критического уровня, при котором не гарантировалась безопасность эксплуатации энергоблоков

#### Причины:

- Ту эбование к транспортировке корпусов по железной дороге пр. вело к небольшому размеру корпуса и, как следствие, к высокой радиационной лагрузке на корпус реактора (в 10 раз выше, чем на аналогичные материалы корпусов в США)
- > Не полноч лонимание на тот момент механизмов радиационного охрупчивания, в частности, роли остаточных примесей (фосфора и меди)
- Отсутствие систем контроля за радиационным охрупчиванием в виде образцов-свидетелей
- > Отсутствие моделей, позволяющих получить достоверную оценку степени радиационного охрупчивания

## РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ 80-х

![](_page_33_Figure_1.jpeg)

## РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ 80-х

## • Проведение восстановительного отжига

![](_page_34_Figure_2.jpeg)

![](_page_34_Picture_3.jpeg)

## Схема радиационного охрупчивания сварного шва КР НВАЭС-3

![](_page_35_Figure_1.jpeg)

## Проведение восстановительного отжига

## корпусов реакторов ВВЭР-440/230

Блок	Начало работы	Отжиг	Режим отжига
НВАЭС-3	4074	1987	430±20°С 150 ч
НВАЭС-3		1991	475±15°С 100 ч
НВАЭС-4	1972	1991	475±15°С 150 ч
КолАЭС-1	1973	1989	475±15°С 150 ч
КолАЭСс	ее число отс	1989 жженных корпу	475±15°С сов ВВЭ₱5018

## <u>Схема РО материалов СШ КР ВВЭР-440/230</u> <u>до и после отжига 475 <sup>о</sup>С 150 час</u>ов

![](_page_37_Figure_1.jpeg)

![](_page_37_Figure_2.jpeg)

• І<sub>2V</sub> – "вертикальный сдвиг"

## <u>состояния материалов корпусов реакторов</u> <u>ВВЭР-440/230</u>

![](_page_38_Figure_1.jpeg)

![](_page_39_Figure_0.jpeg)

Comparison of the experimental and predicted data on irradiation and annealing and re-irradiation response of RPV welds.

![](_page_39_Figure_2.jpeg)

Comparison of the experimental and predicted data on re-irradiation response of RPV welds.

#### Достоинство модели горизонтального сдвига, принятой в РФ для определения кинетики повторного радиационного охрупчивания: → консервативна для всего массива данных РНЦ КИ

![](_page_40_Figure_1.jpeg)

#### Недостаток модели горизонтального сдвига:

→ завышенный уровень консерватизма для швов с P<0.040%

![](_page_41_Figure_2.jpeg)

#### Comparison of predicted and observed values of matrix copper contents variation under irradiation and re-irradiation

![](_page_42_Figure_1.jpeg)

![](_page_43_Figure_0.jpeg)

Материалы ВВЭР - 440, облучение после отжига

#### Результаты исследования материала темплетов позволили продлить ресурс НВАЭС-3 и НВАЭС-4 до

45 лет и отказаться от вырезки темплетов в 2011 году

![](_page_44_Figure_2.jpeg)

![](_page_45_Figure_0.jpeg)

Рис. 5.3. Зависимость величины сдвига температуры вязкохрупкого перехода от флюенса быстрых нейтронов. (а) – основной металл ВВЭР-440 (0.028%Ni, 0.012%P, 0.11%Cu); (б) – основной металл ВВЭР-440 (0.015%Ni, 0.011%P, 0.09%Cu); (в) – сталь А302В (0.017%Ni) [54]; (г) – основной металл германского производства (3.7%Ni, 0.15%Cu) [123].

## Создание модели РО материала сварных швов корпусов реакторов ВВЭР-440/213

![](_page_46_Figure_1.jpeg)

![](_page_46_Figure_2.jpeg)

![](_page_47_Figure_0.jpeg)

Рис. 5.3. Сравнение действительных зеличим радиациснного охгупчивания с нормативными [7] ... материала ... эных швов корпусов реакторов БЭЭ-44': • - сбразцы-сві детели; + - исследовательские программы.

## Сравнение новой (+) и базовой (О) моделей

![](_page_48_Figure_1.jpeg)

#### Обобщенные результаты исследований ОС МШ Ров.АЭС-1

![](_page_49_Figure_1.jpeg)

![](_page_50_Figure_0.jpeg)

Сравнение характеристик реактороз ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

## <u>АЭС с ВВЭР-1000</u>

#### Зависимость радиационного охрупчивания разрабатывается на основе исследования образцов-свидетелей и образцов из

#### исследовательских программ

![](_page_52_Figure_2.jpeg)

#### Недостатки программы ОС ВВЭР-1000

#### Образцы-свидетели облучаются неравномерно

![](_page_53_Figure_2.jpeg)

#### <u>Технология реконструкции применяется для</u> обеспечения представительности результатов программ ОС ВВЭР-1000

![](_page_54_Figure_1.jpeg)

![](_page_54_Picture_2.jpeg)

![](_page_55_Figure_0.jpeg)

Number

![](_page_56_Figure_0.jpeg)

## Ni в значительной степени усиливает РО МКР

![](_page_57_Figure_1.jpeg)

## Нормативная база устарела

![](_page_58_Figure_1.jpeg)

Действующая нормативная зависимость для определения радиационного охрупчивания материала сварных швов ВВЭР-1000 не является консервативной и должна быть изменена

#### Основная проблема: РО МШ с высоким Ni достигло

#### допустимого уровня

![](_page_59_Figure_2.jpeg)

#### Новая модель РО ВВЭР-1000:

![](_page_60_Figure_1.jpeg)

![](_page_61_Figure_0.jpeg)

Продолжительность термичесого старения, часы

Увеличение внутреннего диаметра реактора корпуса для снижения дозовой нагрузки на корпус

Усовершенствов Развитие работ ание по обеспечению нормативнотехнической безопасной корпусов документации аопсидется энне Усовершенствов эксплуатации новых блоков патрубков **кин**баиµпүqхо радиационного

Развитие современных методов исследований

моделей

Разработка новых

Новая программа ОС

вазработка ковых колей

Регламентация по содержанию Ni в обечайках и и РиСu в обечайках зоны инос хамбибра Сопоставление радиационного охрупчивания сталей 15Х2НМФА-А и 15Х2МФА-А при условиях работы реактора АЭС-2006

![](_page_63_Figure_1.jpeg)

## Общая схема определения остаточного ресурса с позиций СХР

![](_page_64_Figure_1.jpeg)