

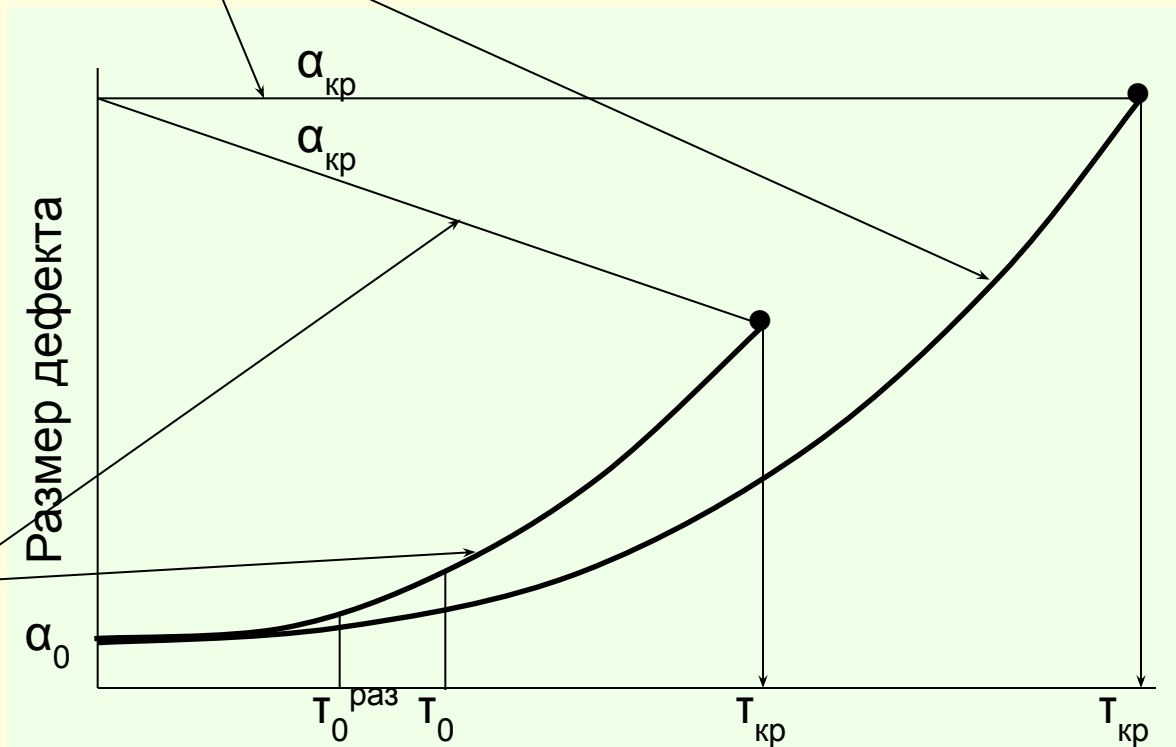


ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ КОРПУСОВ И ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ АЭС С ВВЭР

**Докладчик: Заместитель генерального директора,
д.т.н., профессор Карзов Г.П.**



2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ «РАДИАЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ»



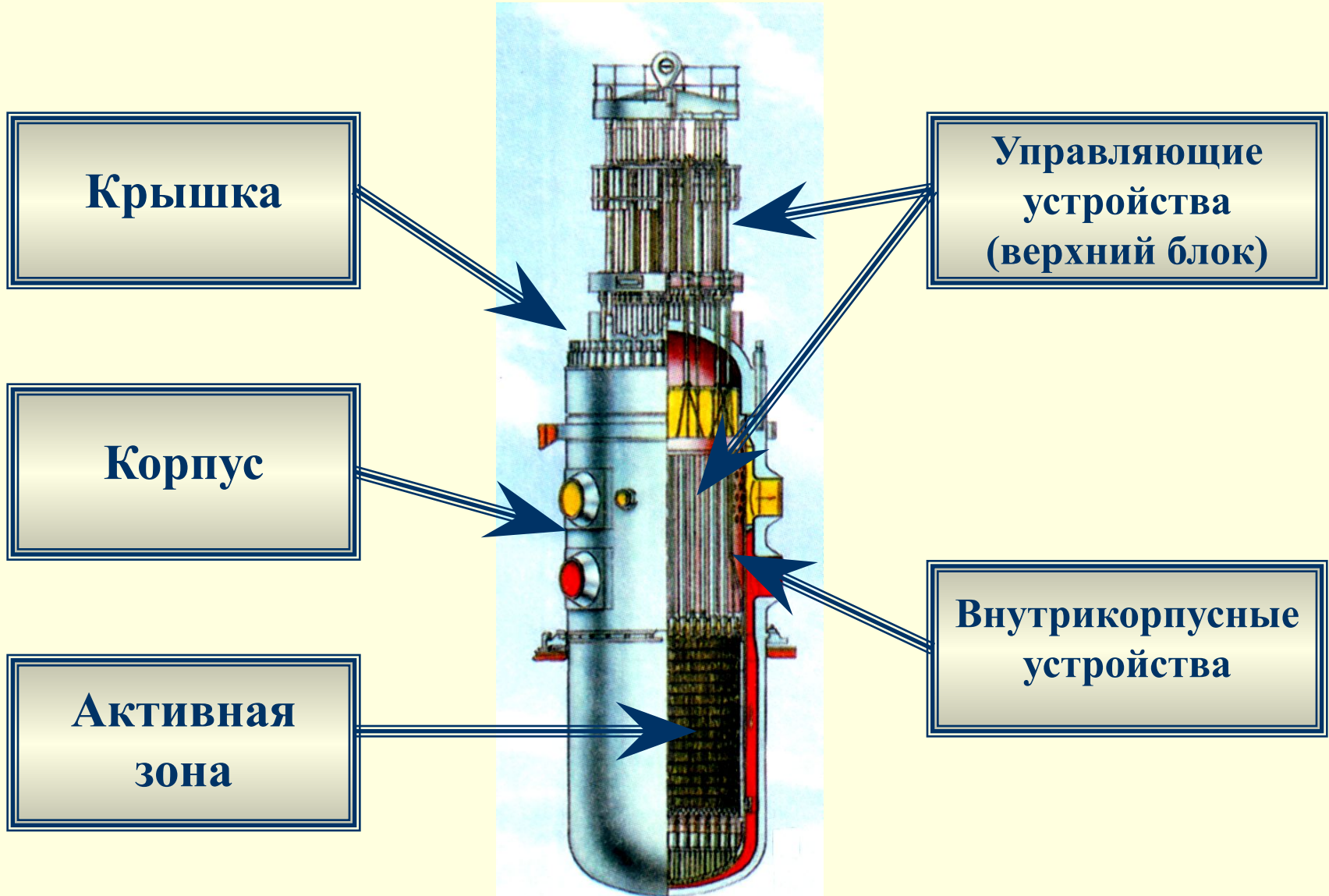
3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ

Обеспечение радиационной прочности достигается путем создания системы противодействия возникновению и развитию разрушения на всех этапах жизни конструкции:

- проектировании
- изготовлении
- эксплуатации

Основной характеристикой радиационной прочности является срок безопасной эксплуатации конструкции.

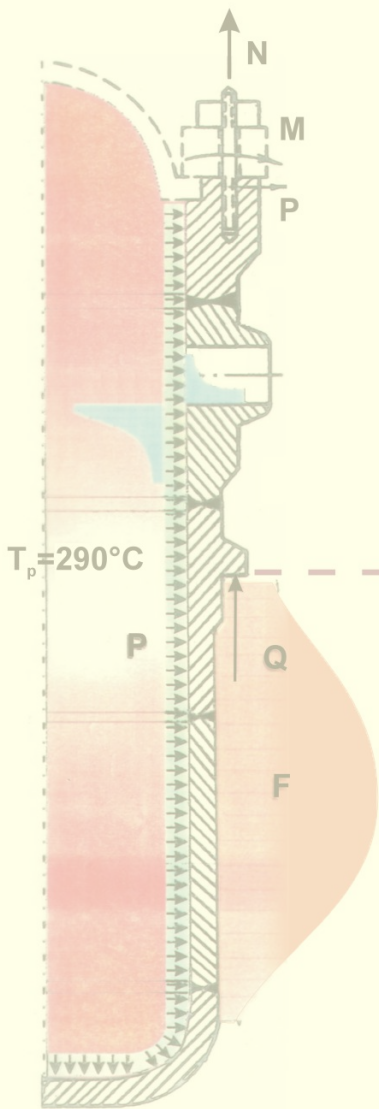
4. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА



6. СХЕМА ОБОСНОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ КР на основании расчетно-экспериментальных методов



7. СХЕМА РАСЧЕТА КОРПУСА РЕАКТОРА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ (УСЛОВИЯ НАГРУЖЕНИЯ КОРПУСА РЕАКТОРА ПРИ АВАРИЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ)

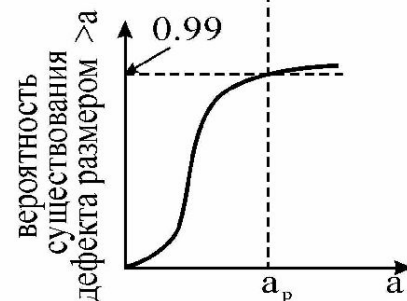
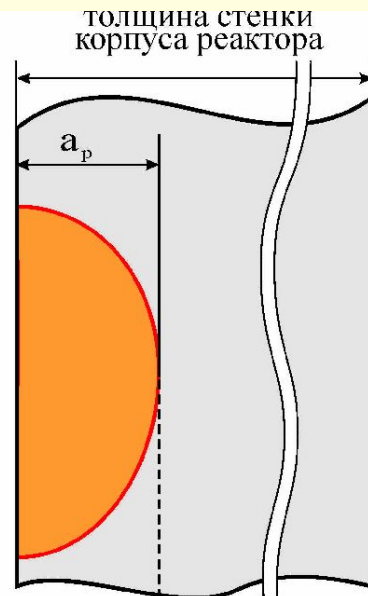
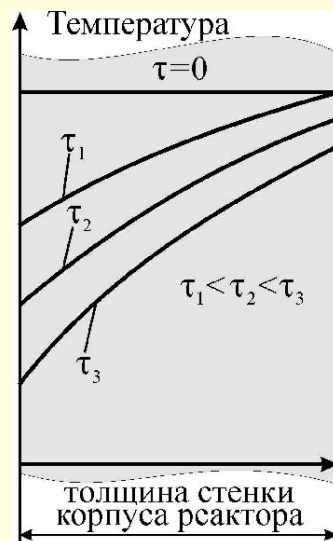


Верхняя зона

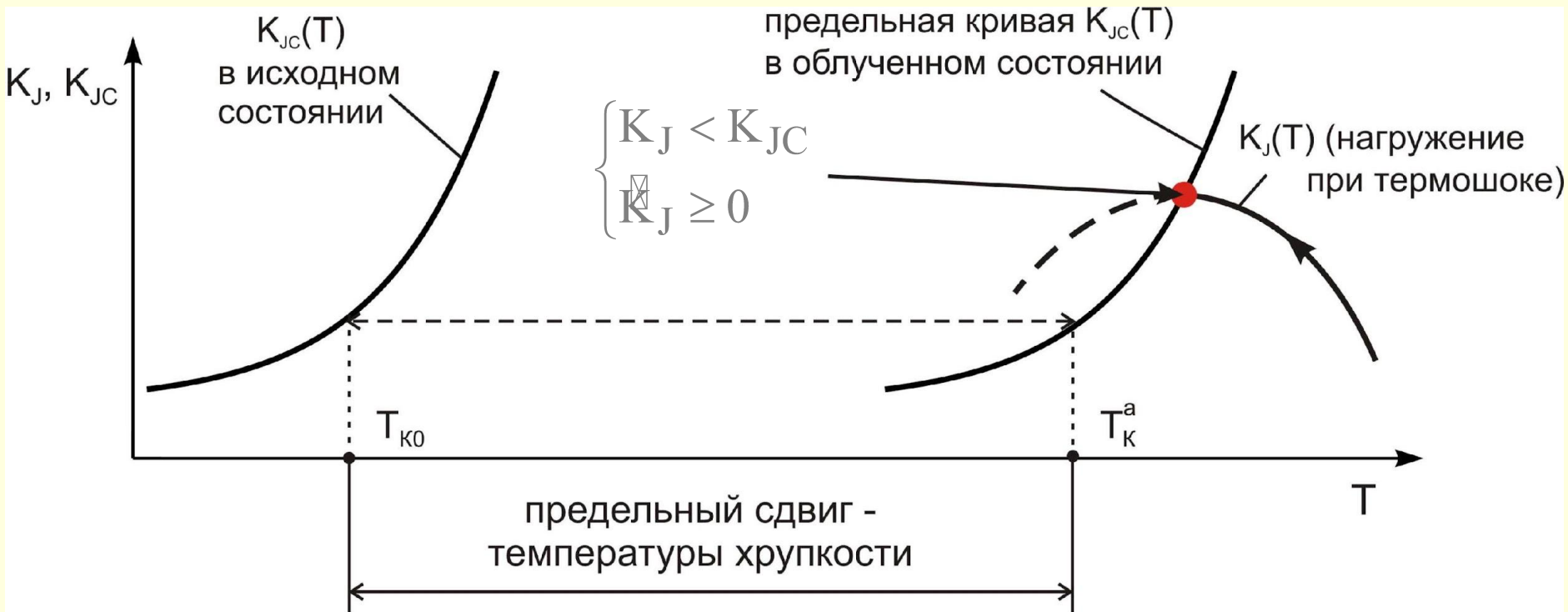
1. Напряжения от внутреннего давления.
 2. Усилия в зоне фланца и опорного бурта.
 3. Концентрация напряжений в зоне патрубков.
- Статическое и циклическое нагружение.

Нижняя зона

1. Напряжения от внутреннего давления.
2. Охрупчивание металла под воздействием облучения.
3. Нестационарные температурные напряжения при аварийном охлаждении.



8. СХЕМА РАСЧЕТА КОРПУСА РЕАКТОРА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ (ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОКРИТИЧЕСКОГО ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ)



Предельный флюенс:

$$F = \left(\frac{T_K^a - T_{K0}}{A_F} \right)^n$$

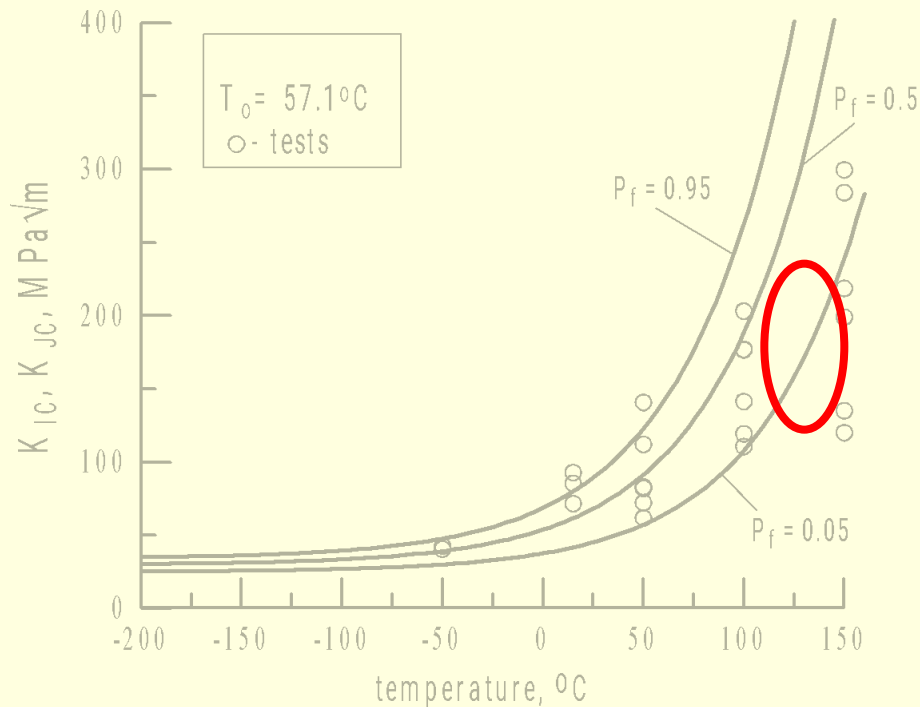
Ресурс:

$$t = \frac{F}{\Phi}$$

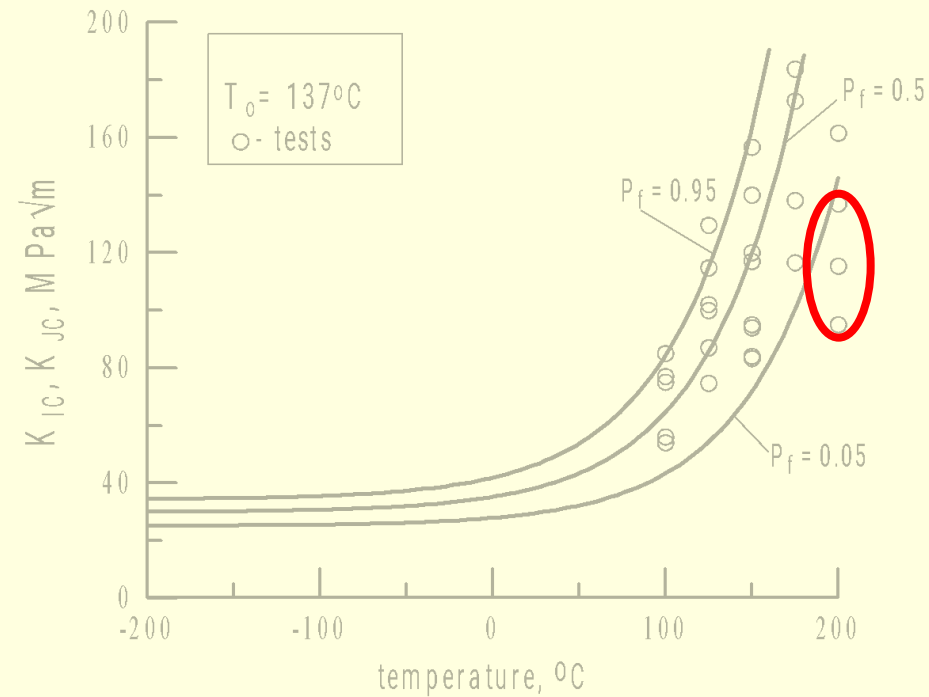
Φ – флякс нейтронов

9. ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ $K_{JC}(T)$ ДЛЯ СИЛЬНО ОХРУПЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

сталь 15Х2НМФА,
сильно охрупченное состояние
(термообработка)



металл сварного шва KS01,
сильно охрупченное состояние
(нейтронное облучение)



Кривые – прогноз по методам, использующим условие горизонтального сдвига
Точки – экспериментальные значения

Для сильно охрупченных материалов форма кривой $K_{JC}(T)$ изменяется, следовательно, необходимо использовать методы, которые учитывают это изменение.

10. ЛОКАЛЬНЫЙ ПОДХОД В МЕХАНИКЕ РАЗРУШЕНИЯ

Локальный подход – это "мост", который связывает микромеханизмы разрушения на атомарном и дислокационном уровнях и макроразрушение материала.

физический механизм разрушения

хрупкое разрушение - *скол, микроскол*; вязкое – *образование и рост микропор*; усталостное – *усталостные повреждения*; разрушение при ползучести – *межзеренное кавитационное повреждение*



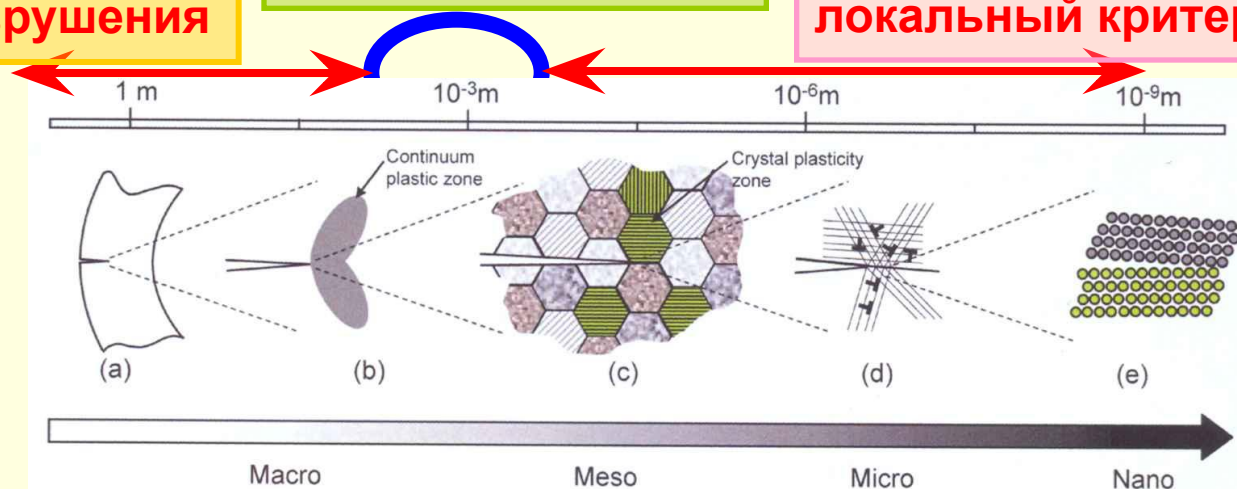
локальный критерий разрушения –

критерий разрушения, выраженный в терминах механики деформируемого твердого тела, с внутренними параметрами, связанными с физическими механизмами разрушения и структурой материала

механика разрушения

локальный подход

локальный критерий



Применение локального подхода в механике разрушения позволяет рассчитывать **предельное состояние и долговечность элементов конструкций**

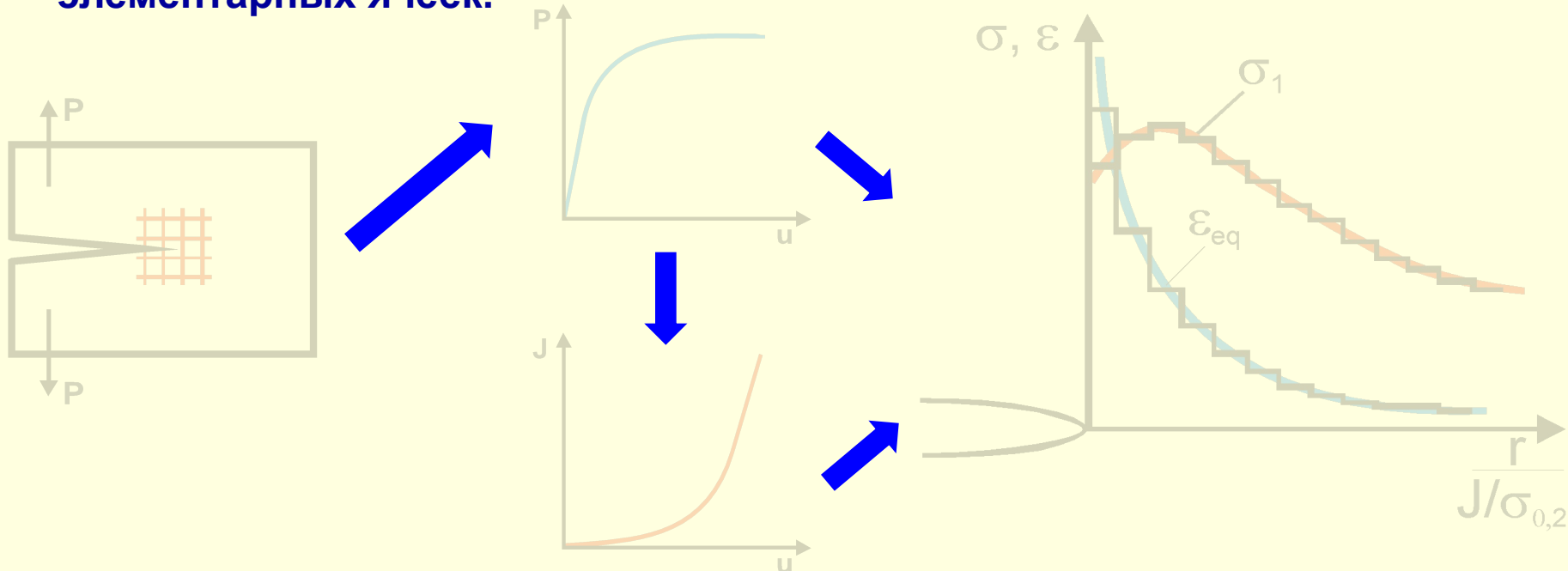
11. ЛОКАЛЬНЫЙ ПОДХОД В МЕХАНИКЕ ТРЕЩИН

Позволяет определять критические значения параметров механики разрушения K_{IC} , J_C и зависимости, описывающие кинетику трещин, $J_R(\Delta a)$,

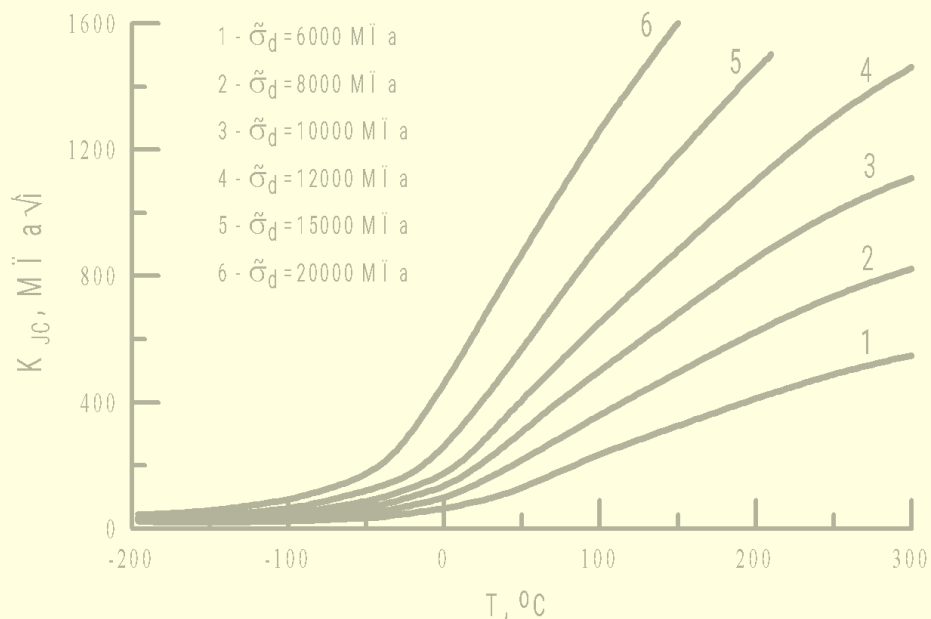
$$\frac{dL}{dN} = f(\Delta K, \dots), \quad \frac{dL}{d\tau} = f(C^*, \dots), \dots$$

Общий принцип определения критических параметров

1. Материал представляется как конгломерат элементарных ячеек, для которых сформулирован локальный критерий разрушения.
2. Рассчитывается НДС у вершины трещины и определяются параметры нагружения (например, J или K), при которых выполняется критерий разрушения для элементарной ячейки или конгломерата элементарных ячеек.



12. МЕТОД «UNIFIED CURVE» («Единая кривая»)



Результаты расчета по локальному критерию хрупкого разрушения при различной степени охрупчивания $\tilde{\sigma}_d$
Методика МКс-КР-2000 (РД ЭО 0350-02)

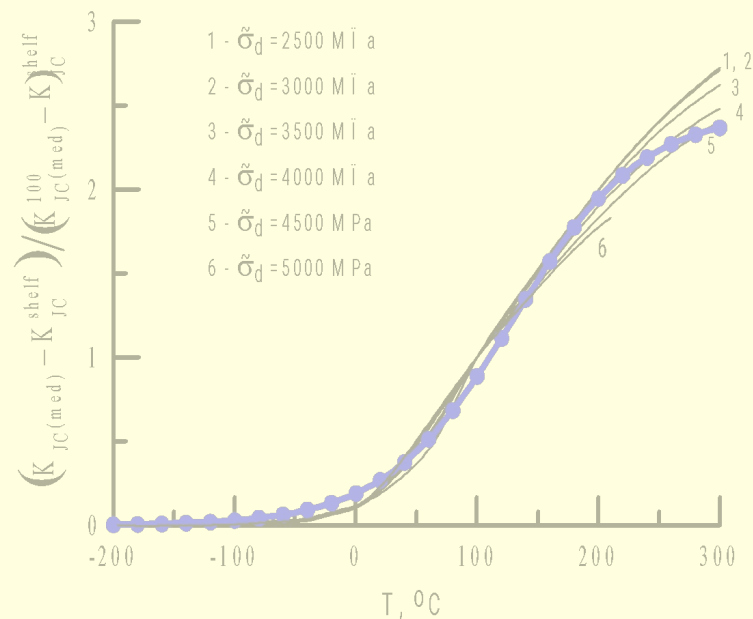


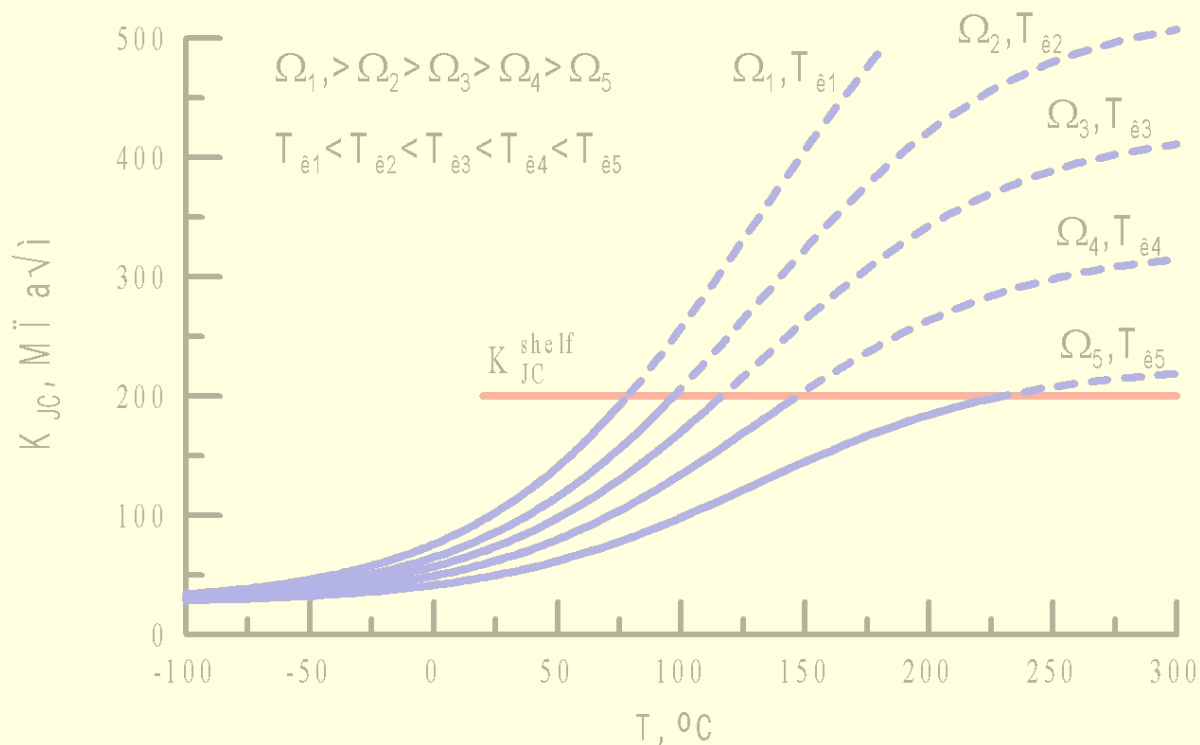
Иллюстрация подобия кривых (см. левый рисунок): кривые «сворачиваются» в «Единую кривую» при их нормировании на некоторый уровень $K_{JC} = \Omega$

13. МЕТОД «UNIFIED CURVE» («Единая кривая»)

Температурная зависимость вязкости разрушения для корпусных реакторных сталей с различной степенью охрупчивания при $B=25$ мм и $P_f=0,5$ описывается уравнением

$$K_{JC(\text{med})} = K_{JC}^{\text{shelf}} + \Omega \left(1 + \tanh \left(\frac{T - 130}{105} \right) \right), \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$$

где $K_{JC}^{\text{shelf}} = 26 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$; T – температура в $^{\circ}\text{C}$



Параметр Ω – единственный параметр, который зависит от степени охрупчивания материала.

Параметр Ω уменьшается с увеличением степени охрупчивания материала.

14. СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ $K_{JC}(T)$, РАСЧИТАННЫХ ПО «MASTER CURVE» И «UNIFIED CURVE»

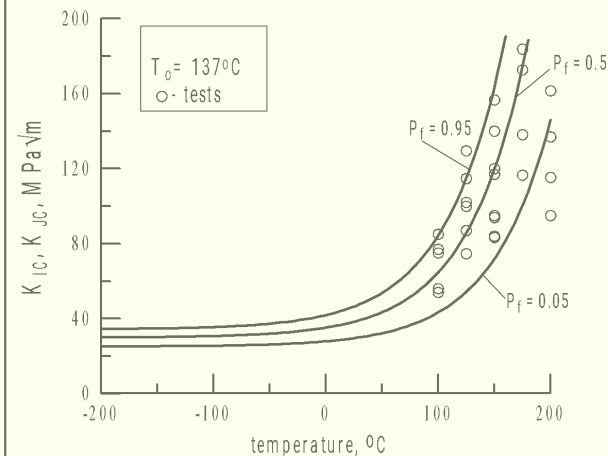
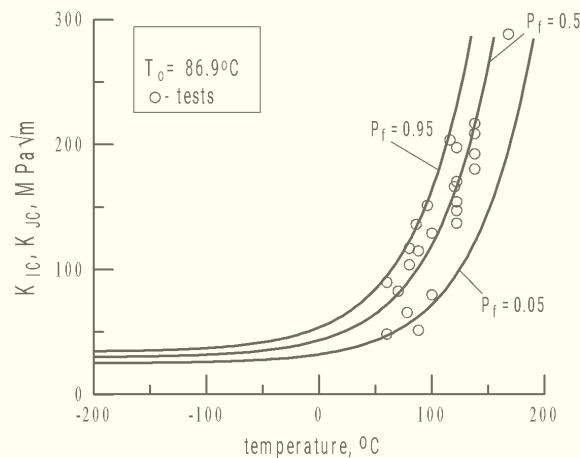
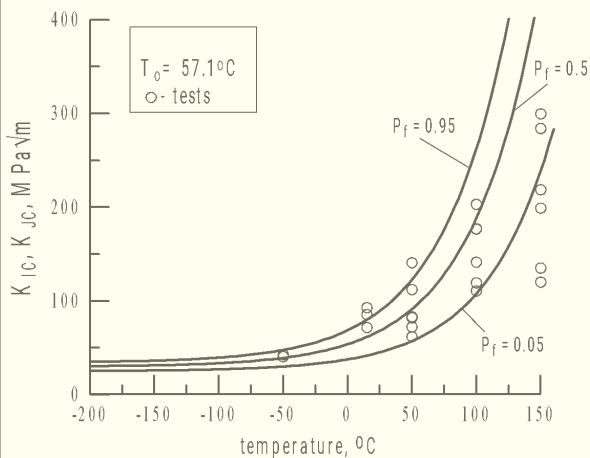
ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ КР ПРИ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ОХРУПЧИВАНИЯ

охрупченный материал
(ЦНИИ КМ «Прометей»)

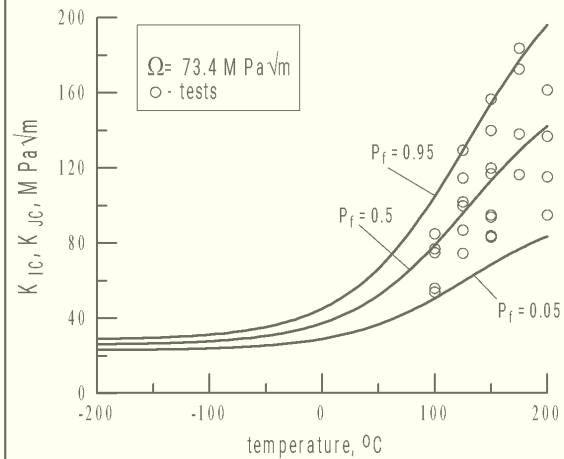
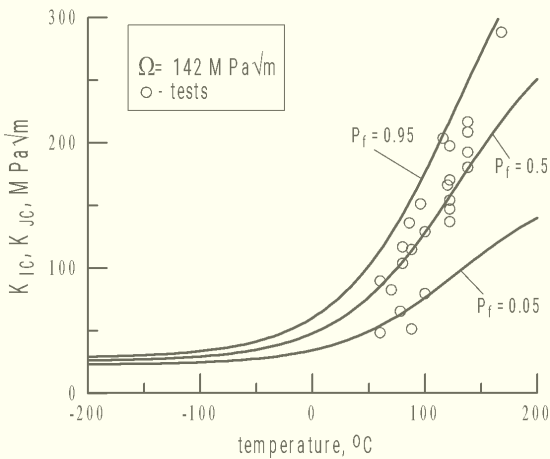
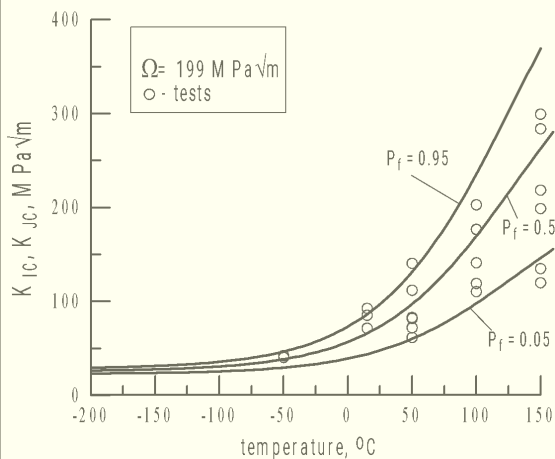
облученный материал
(VTT, Финляндия)

облученный материал
(ORNL, США)

MASTER CURVE



UNIFIED CURVE



15. СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ КОРПУСОВ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ

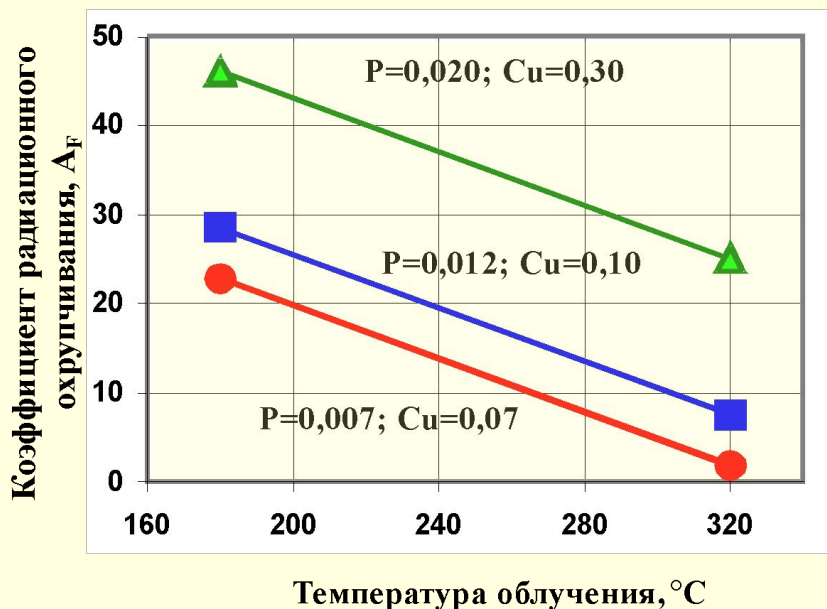


16. РОССИЙСКИЕ СТАЛИ ДЛЯ КОРПУСОВ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ

Марка стали, базовая композиция	Год начала приме- нения	Типы и количество установок	Категория прочности	Макси- мальная толщина стенки, мм	Исходная критическая температура хрупкости $T_{ко}$, °C	Темпера- тура эксплуа- тации, °C	Проектный флюенс, н/см ²	Значения критической температуры хрупкости на конец срока эксплуатации, ° C
15X2МФА 0,12 %C, 2,8 % Cr, 0,8 % Mo, 0,2 % V	1958	ВВЭР-440 - 32 шт.; АЭУ ВМФ ~ 300шт.; АЭУ атомных ледоколов - 18 шт.	КП-40	400	≤0	270	(2÷2,4) · 10²⁰	+70
15X2НМФА 0,12 % C; 2,3 % Cr Ni(1,0÷1,5)% 0,8 %Mo; 0,15% V	1973	ВВЭР-1000 - 38 шт.	КП-45	400	≤-25	290	(4÷6) · 10¹⁹	+70
Требования к сталям для корпусов нового поколения атомных реакторов								
	2007	Все типы водо-водяных АЭУ	КП-45	560	≤-35	270-290	5 · 10¹⁹ -2,4 · 10²⁰	≤30

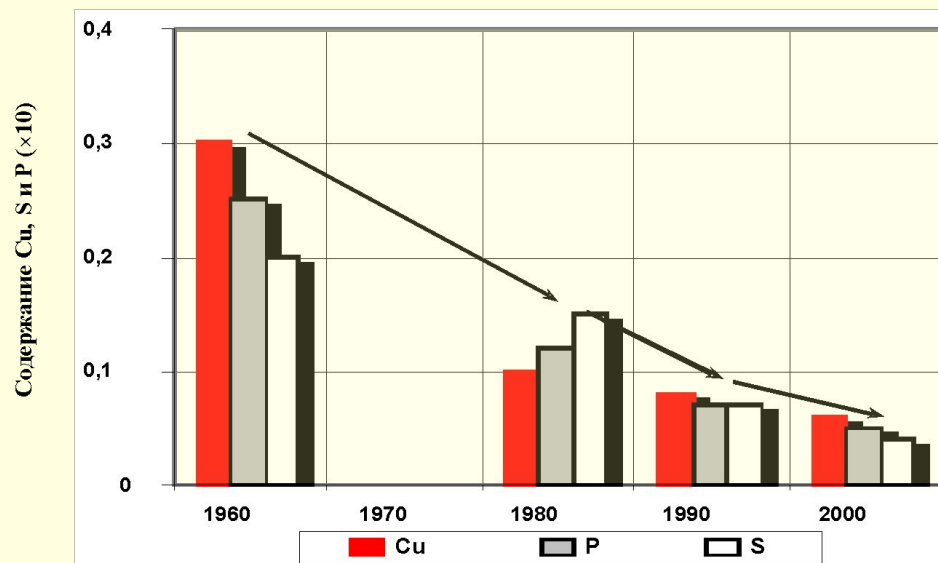
17. ПОВЫШЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛИ Cr-Mo-V КОМПОЗИЦИИ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПРИМЕСЕЙ P и Cu

Влияние примесей
на радиационное охрупчивание



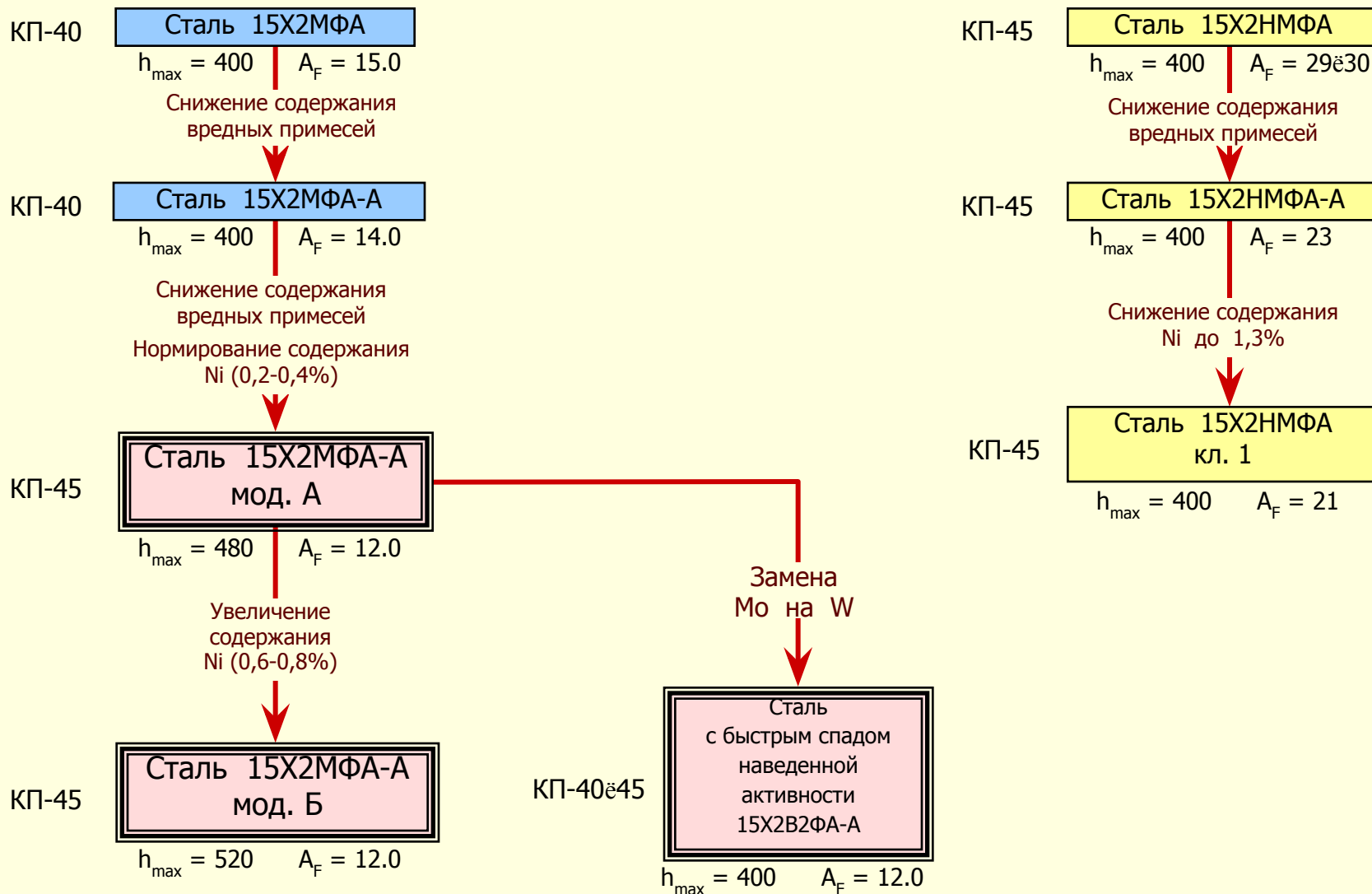
a)

Снижение содержания примесей за
счет совершенствования технологии
выплавки



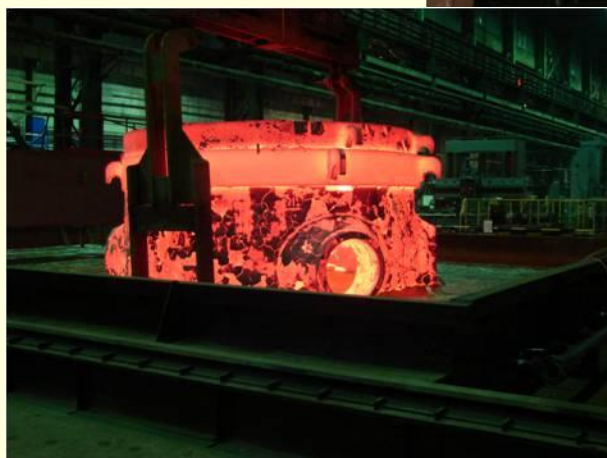
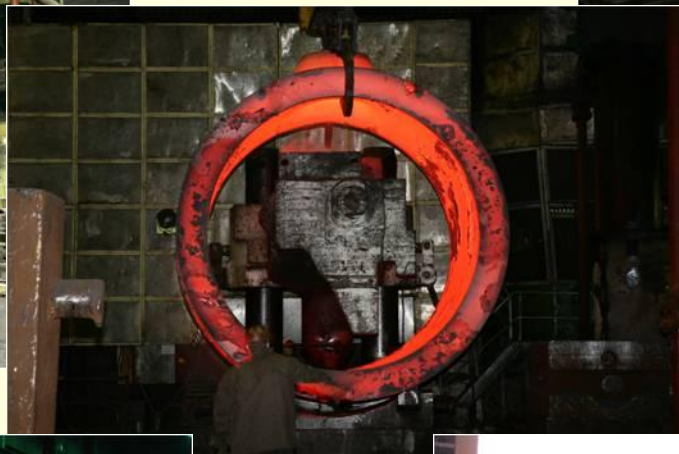
b)

18. ЭВОЛЮЦИЯ СТАЛЕЙ ДЛЯ КОРПУСОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ



19. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБЕЧАЙКИ ЗОНЫ ПАТРУБКОВ

В рамках проекта «Проведение комплекса работ по обеспечению возможности изготовления корпусов реакторов ВВЭР из стали марки 15Х2МФА-А модификации А категории прочности КП-45», финансируемого концерном «Росэнергоатом», была изготовлена и исследована опытно-промышленная обечайка зоны патрубков реактора ВВЭР-1000 из слитка массой 235,0 т.

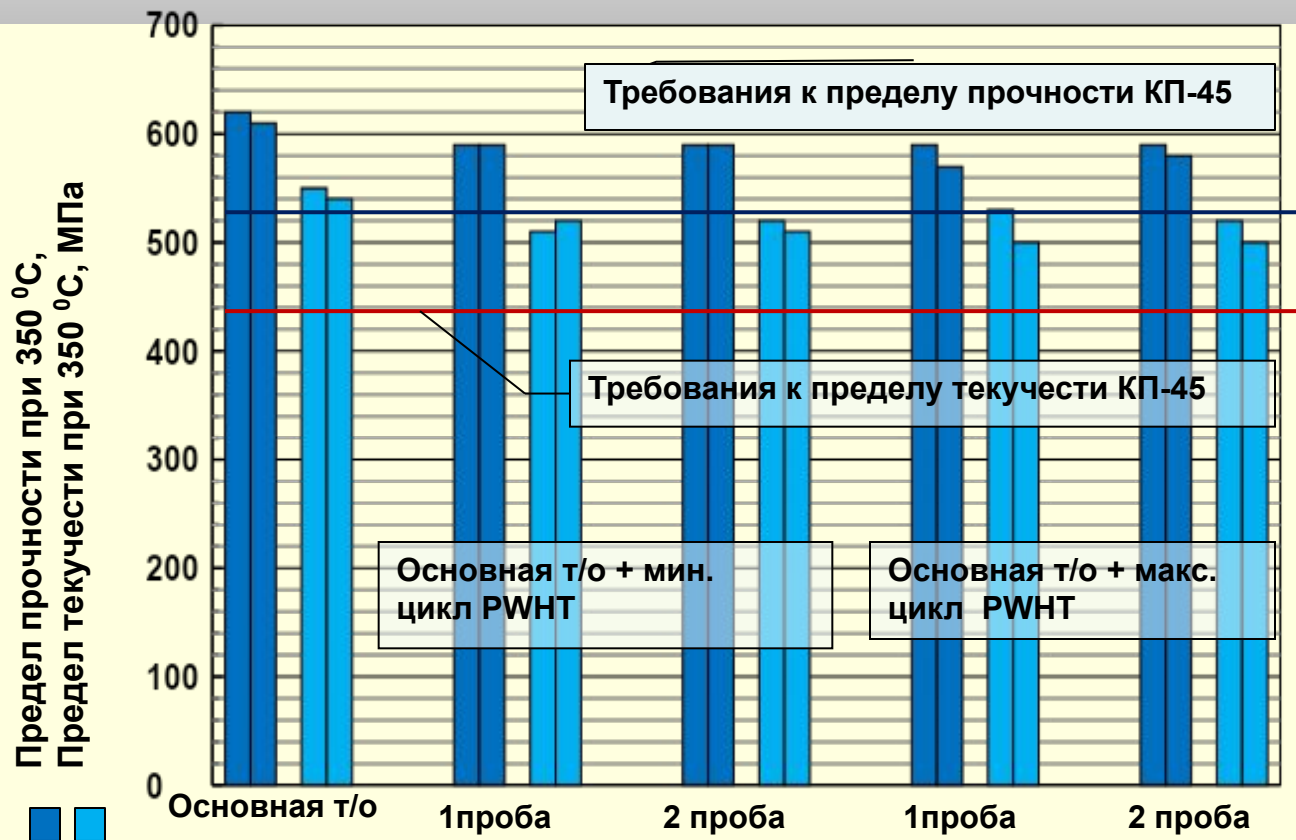


20. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ОЗП

Сталь марки 15Х2МФА-А мод. А обеспечивает уровень прочности, соответствующий категории прочности КП-45 с запасом 50-30 МПа после основной термической обработки и дополнительных отпусков по минимальному и максимальному циклам.

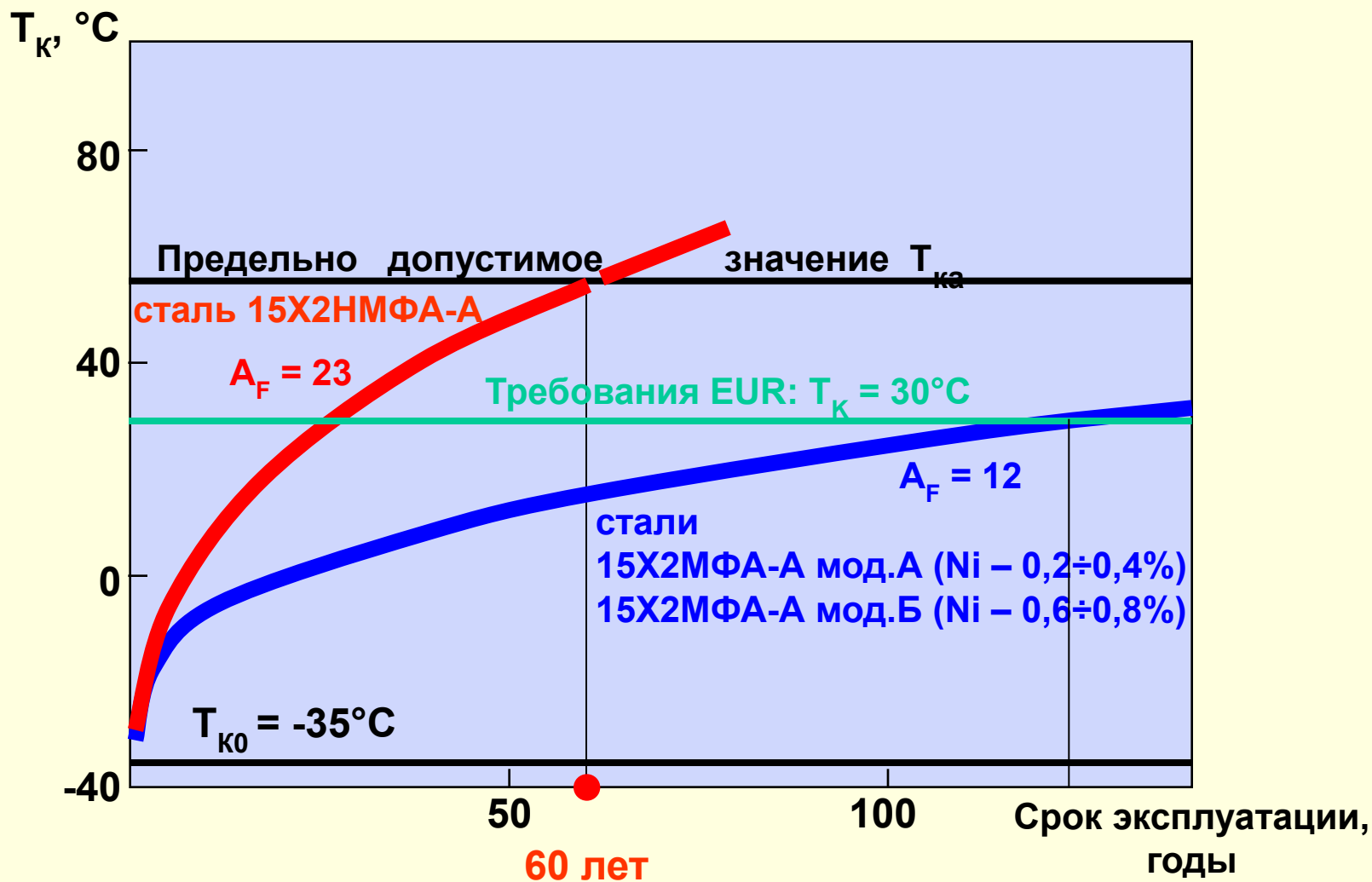
Это создает возможность проведения дополнительных технологических отпусков (например, при усложнении конструкции или ремонте).

Исходная критическая температура хрупкости составляет минус 75 - минус 95⁰С.



Сталь обладает хорошей отпускостойчивостью - снижение прочностных характеристик после доп. отпусков составляет максимум 50 МПа; различия в прочностных характеристиках после минимума и максимума технологических отпусков составляет 10-20 МПа.

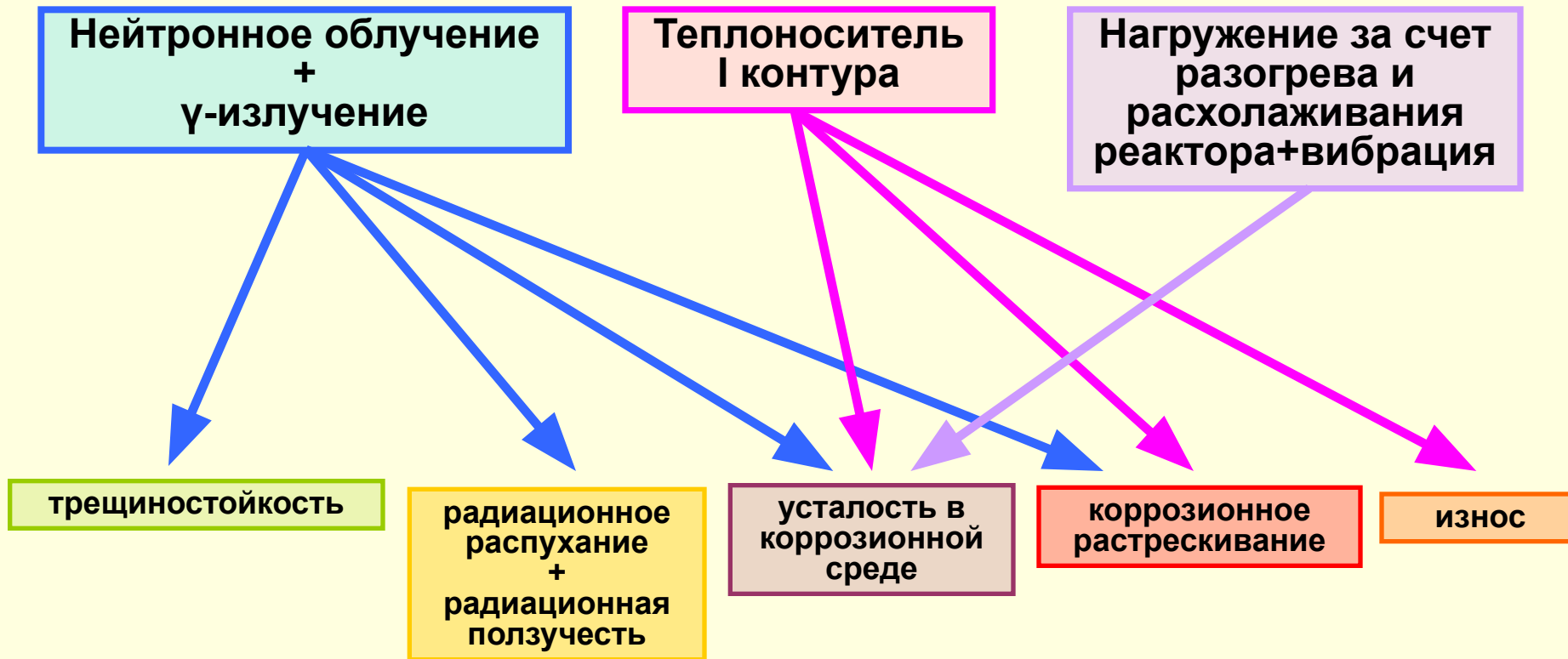
21. СОПОСТАВЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО ОХРУПЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ 15Х2НМФА-А, 15Х2МФА-А мод.А (Ni – 0,2÷0,4%) и мод.Б (Ni – 0,6÷0,8%) ПРИ УСЛОВИЯХ РАБОТЫ РЕАКТОРА АЭС-2006



22. ПРОЧНОСТЬ ВКУ РЕАКТОРОВ ВВЭР: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

ОСНОВНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ,
ВЛИЯЮЩИЕ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ВКУ

Материал ВКУ - сталь X18Н10Т



23. ПОЧЕМУ НЕОБХОДИМО АНАЛИЗИРОВАТЬ КОНСТРУКЦИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ВКУ

Сильное нейтронное облучение приводит к:

- возникновению значительных напряжений из-за градиента распухания
- недопустимым изменениям формы и размеров элементов
- снижению трещиностойкости (J_c) более чем в 10 раз
- снижению сопротивлению усталостному разрушению и коррозионному растрескиванию

**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ВКУ
МОЖЕТ БЫТЬ НАРУШЕНА**

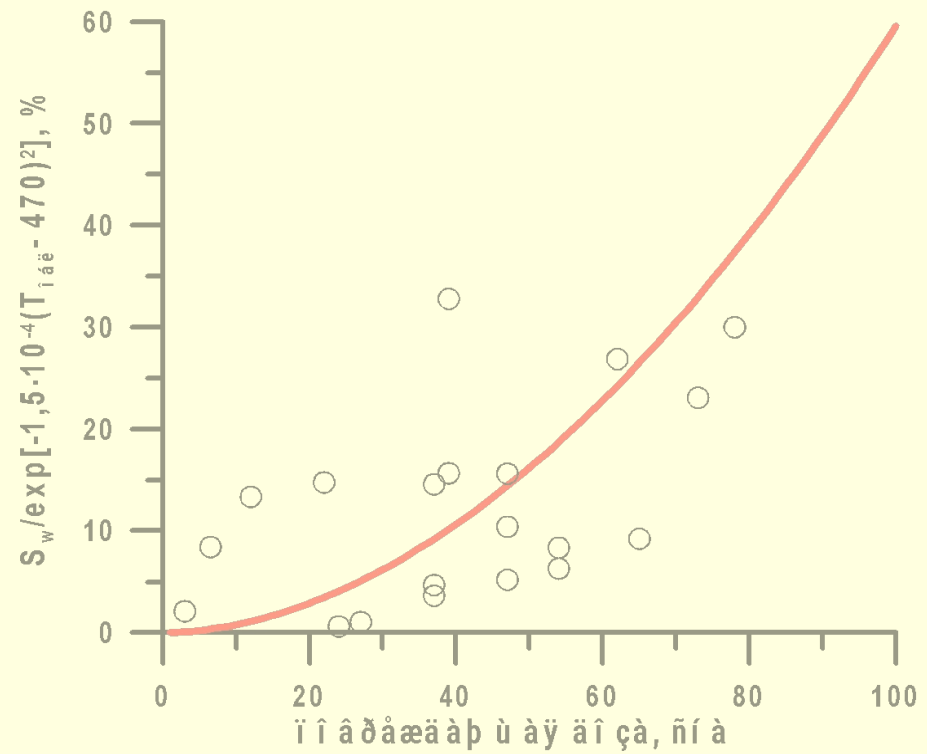
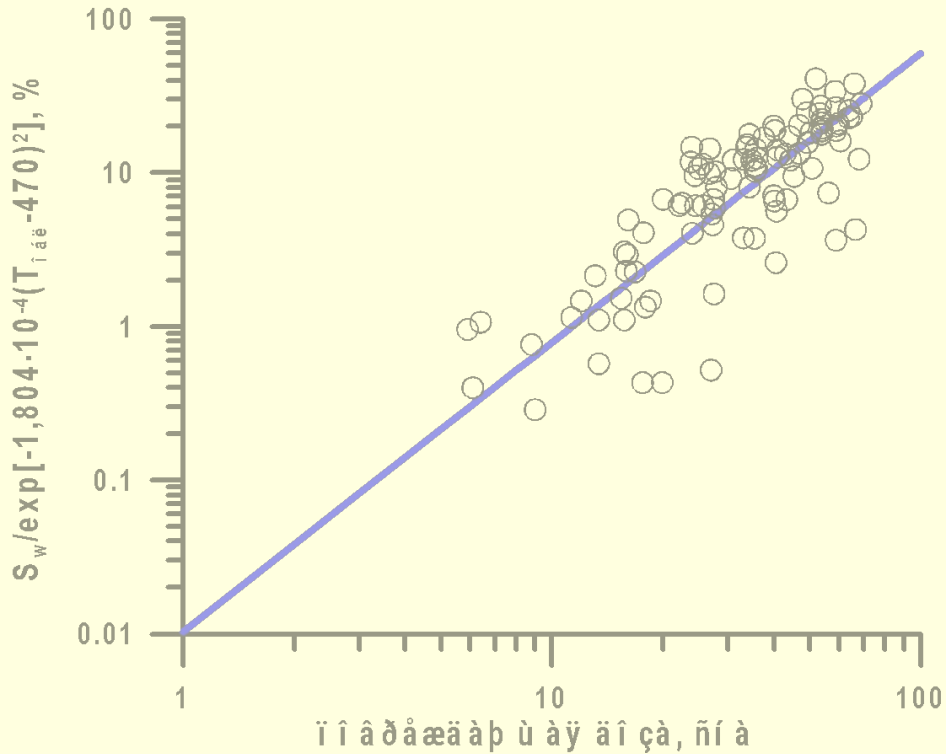
24. МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ, РЕШЕНИЕ КОТОРЫХ НЕОБХОДИМО ПРИ СОЗДАНИИ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ВКУ

Материаловедческие задачи	Методические задачи
<p>Радиационное распухание (в зависимости от температуры и повреждающей дозы нейтронного облучения).</p>	<p>Расчет напряженно-деформированного состояния элементов ВКУ при термомеханическом нагружении с учетом нейтронного облучения.</p>
<p>Радиационная ползучесть (в зависимости от температуры и скорости набора повреждающей дозы нейтронного облучения).</p>	
<p>Вязкость разрушения (в зависимости от температуры эксплуатации, температуры облучения и повреждающей дозы нейтронного облучения).</p>	<p>Формулировка предельного состояния элемента ВКУ по критерию нестабильного развития трещины с учетом фазового превращения</p>
<p>Прочность по критерию зарождения трещины при коррозионном растрескивании (в зависимости от повреждающей дозы нейтронного облучения).</p>	<p>Методология расчета повреждений по механизмам коррозионного растрескивания при длительном статическом нагружении и усталости при циклическом нагружении.</p>
<p>Сопротивление усталости в зависимости от температуры облучения, повреждающей зоны с учетом влияния коррозионной среды.</p>	
<p>Скорость роста трещины по механизму коррозионного растрескивания (в зависимости от нагрузки и повреждающей дозы нейтронного облучения).</p>	
<p>Скорость роста усталостной трещины на воздухе и в коррозионной среде (в зависимости от циклической нагрузки, частоты нагружения и повреждающей дозы нейтронного облучения).</p>	
<p>Условия реализации фазового превращения как функции распухания</p>	

25. РАСПУХАНИЕ СТАЛИ X18H10T

$$\frac{dF}{dt} = 5 \div 20 \text{ сна/год}$$

$$\frac{dF}{dt} = 0,2 \div 4 \text{ сна/год}$$



$$r_h = 1,804 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

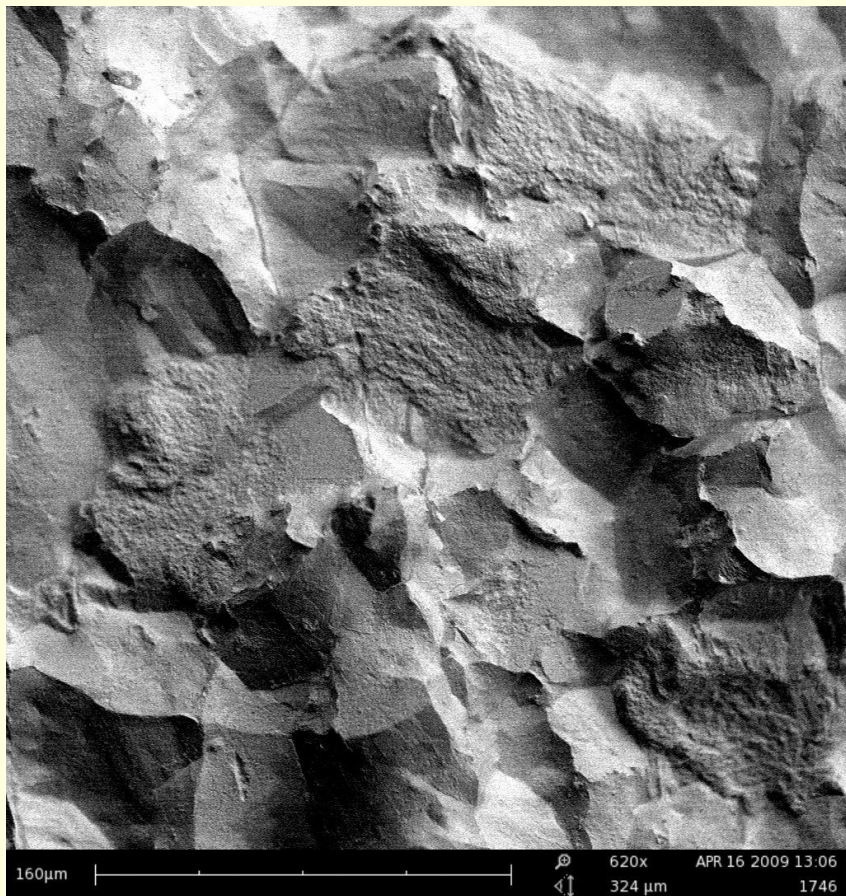
$$r_l = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$n = 1,88; T_{\max} = 470^\circ\text{C};$$

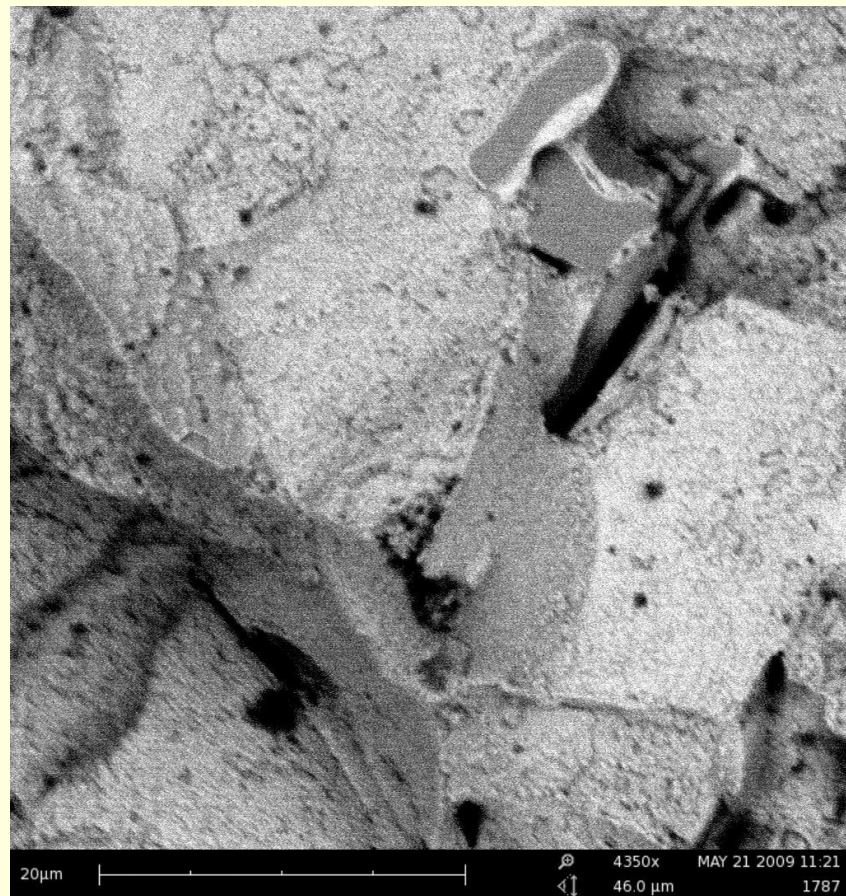
$$c = 1,035 \cdot 10^{-4}$$

26. СИЛЬНАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ВКУ. СВЯЗЬ МЕЖДУ РАДИАЦИОННЫМ ОХРУПЧИВАНИЕМ И РАСПУХАНИЕМ

ПОВЕРХНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА СТАЛИ Х18Н10Т,
ОБЛУЧЕННЫХ ДОЗОЙ 49 сна, $T_{обл} = 400-450^{\circ}\text{C}$

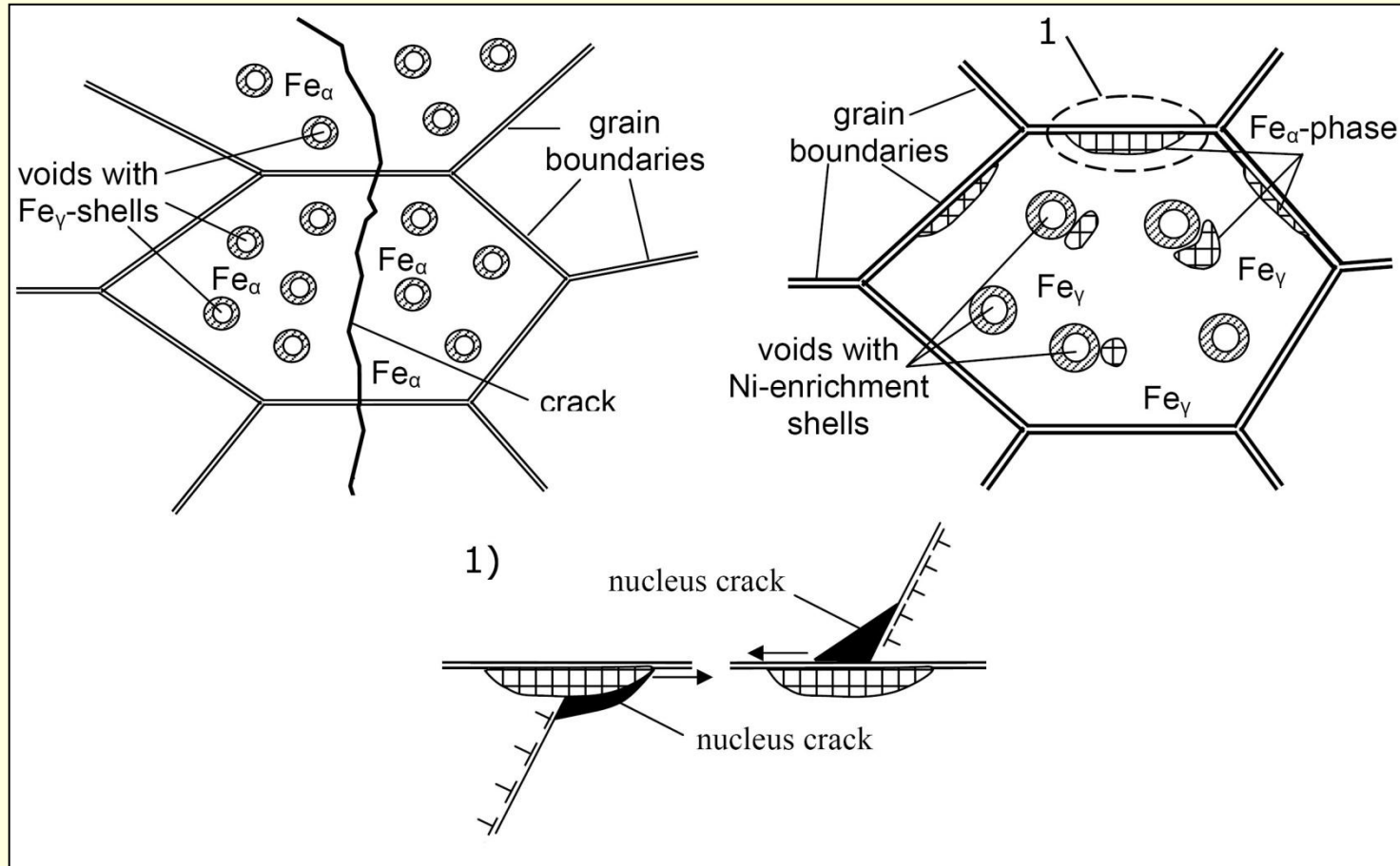


a) $T_{исп} = 20^{\circ}\text{C}$

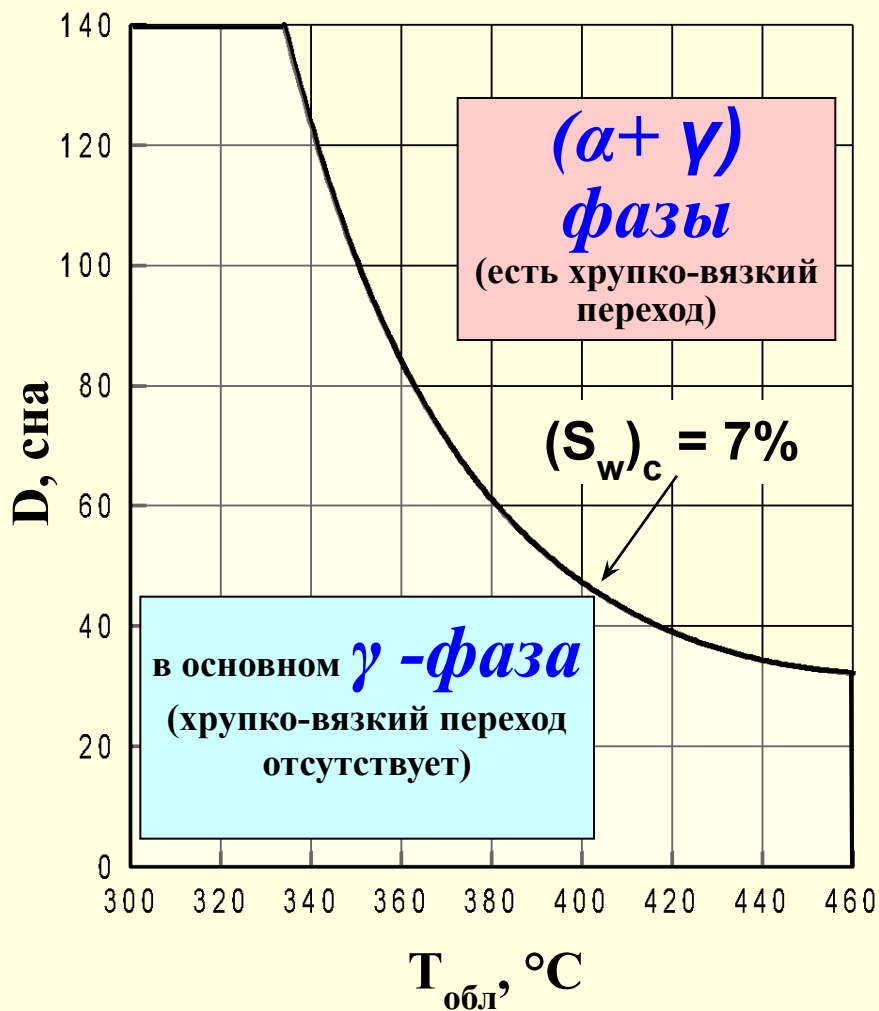


b) $T_{исп} = 495^{\circ}\text{C}$

27. МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПОСЛЕ $\gamma \rightarrow \alpha$ ПРЕВРАЩЕНИЯ



28. ПАРАМЕТРЫ ОБЛУЧЕНИЯ, ПРИВОДЯЩИЕ К $\gamma \rightarrow \alpha$ ПРЕВРАЩЕНИЮ И ВОЗНИКНОВЕНИЮ ХРУПКО-ВЯЗКОГО ПЕРЕХОДА В АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ



$$S_w = (T_{\text{обл}}, D, \frac{dD}{dt}) = (S_w)_c$$

для флакса $\frac{dD}{dt} \cong 5 \cdot 10^{-8} \text{ см/с}$:

$$S_w = C_D D^n \exp[-r(T_{\text{обл}} - T_{\text{max}})^2]$$

Параметры уравнения для стали X18H01T:

$$C_D = 1.035 \cdot 10^{-4},$$

$$n = 1.88$$

$$T_{\text{max}} = 470^\circ\text{C}$$

$$r = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$$

29. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ ВКУ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ $\gamma \rightarrow \alpha$ ПРЕВРАЩЕНИЯ

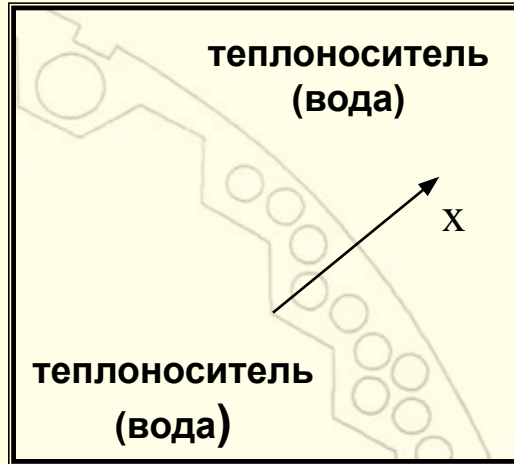
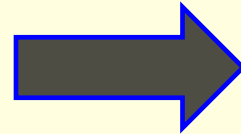
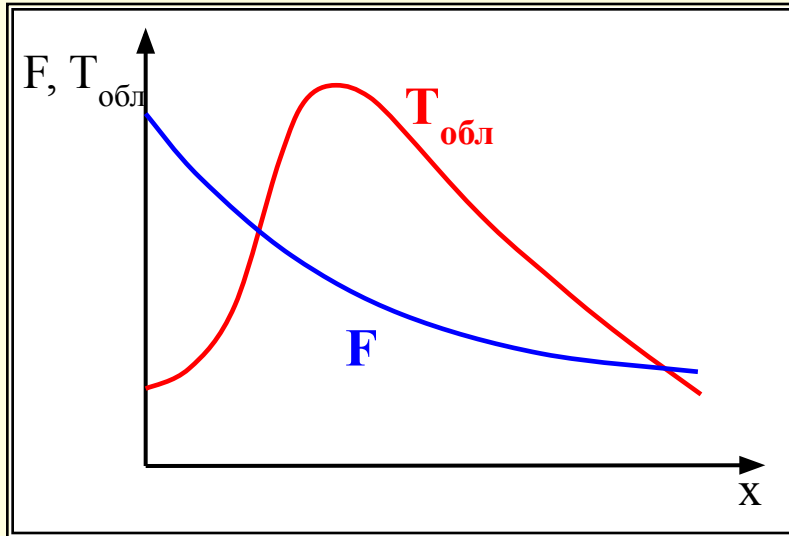
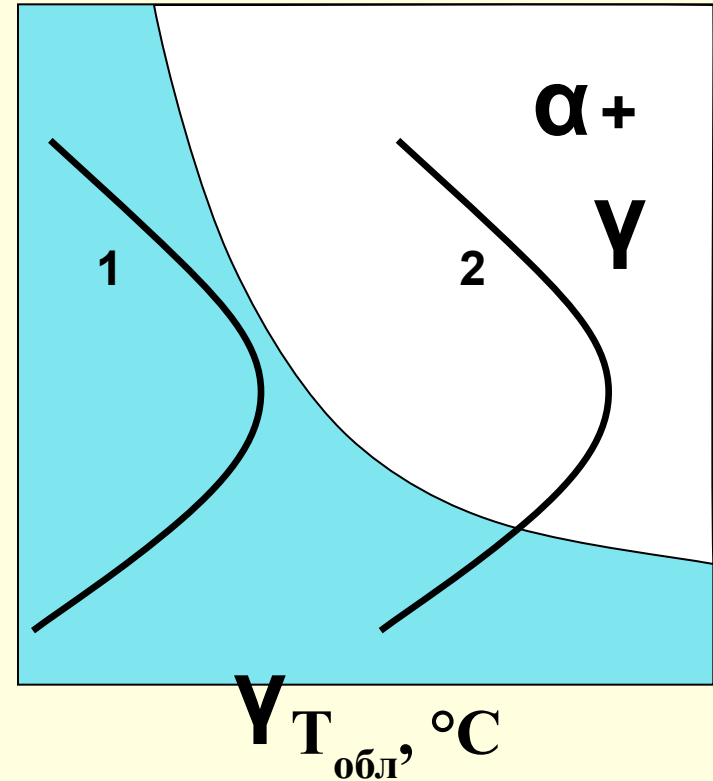


Схема выгородки



D, снм

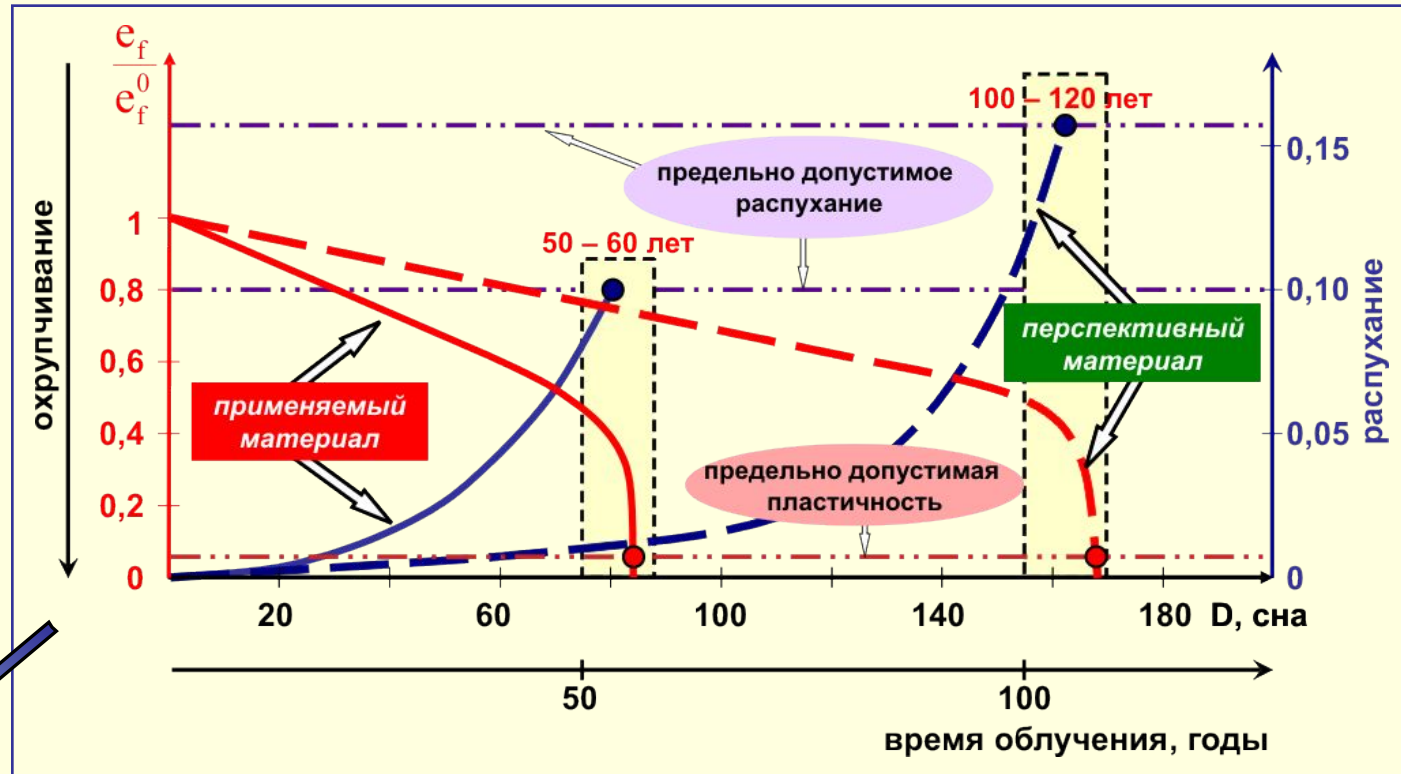
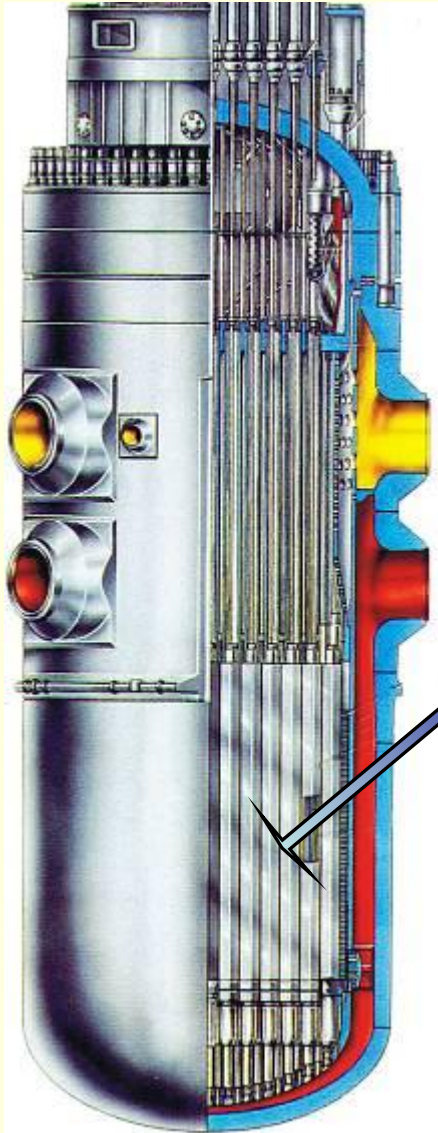


Распределение температуры и флюенса нейтронов по толщине стенки выгородки

Хороший и плохой пример конструкции ВКУ с точки зрения $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, приводящего к возникновению хрупко-вязкого перехода:

- 1 – хорошая конструкция
- 2 – плохая конструкция

30. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР



применяемый материал — сталь X18H10T

перспективный материал — сталь с повышенным содержанием никеля с наноструктурой в виде доменов ближнего порядка

31. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Созданные новые реакторные корпусные стали и соответствующие им сварные соединения позволяют практически снять ограничения срока службы корпусов атомных реакторов по условию радиационного охрупчивания металла.
2. Заданный комплекс эксплуатационных характеристик сталей обеспечивается в металлургических заготовках толщиной до 525 мм.
3. Все разработанные новые реакторные стали, сварочные материалы и технологии сварки освоены в промышленном производстве, что позволяет использовать их для изготовления корпусов атомных реакторов в самом ближайшем будущем.

32. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ

1. Промышленное освоение и всесторонняя аттестация сталей и сварных соединений для корпусов реакторов большой и средней мощности.
2. Разработка и всестороннее исследование высокорационностойкой стали для внутрикорпусных устройств реакторов большой мощности.
3. Совершенствование методов расчетного анализа повреждения конструкционных материалов в условиях работы атомных реакторов различного назначения и создание методов расчетного обеспечения их безопасного срока эксплуатации.
4. Материаловедческое сопровождение работ по продлению срока службы оборудования действующих атомных энергетических установок различного назначения.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!