



ГК «РОСАТОМ»,
24 ноября 2022 г.

Научный Семинар
«УТС и плазменные
технологии»



ВНИИНМ
имени А.А.Бочвара

МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ – ПРОБЛЕМЫ И ПУТЬ ВПЕРЁД

В.М. Чернов

**Высокотехнологический НИИ неорганических материалов
имени академика А.А. Бочвара (АО «ВНИИНМ»)**

Москва, Э-почта: VMChernov@bochvar.ru



Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры
имени Д. В. Ефремова

И. В. Альтовский, В. А. Бурцев, В. А. Глухих, И. В. Горынин,
В. Ф. Зеленский, Л. И. Иванов, Б. Г. Карасев, Н. А. Моноссон,
В. В. Орлов, А. М. Паршин, Г. Л. Саксаганский,
В. Г. Тельковский, С. И. Турчин, П. А. Фефелов

ИСХОДНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ
ПРОГРАММЫ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ И ИССЛЕДОВАНИЮ
МАТЕРИАЛОВ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

2022 г.:

- ИТЭР (РФ-ИТЭР), 2035 г.
- Проекты ДЕМО-ТЯР :
EURO-DEMO (500 MWe, 2040-2050),
Ja-DEMO.
РФ-ДЕМО - проект РНЦ КИ ДЕМО-С, 2000.
- Нейтронные источники:
Проекты: IFMIF (МЭА, Япония),
IFMIF-DONES (ЕС, Испания).

Ленинград
1978

Серьезность и многоплановость этой проблемы определяется следующими факторами:

1. Инженерно-физической сложностью любого мыслимого на сегодня термоядерного реактора как ядерно-энергетической системы.
2. Разнообразием физических концепций ТЯР, принципов построения их отдельных систем и вытекающей из этого разнообразия широты вовлекаемых в рассмотрение классов материалов...
3. Экстремальными значениями ... нагрузок на материалы важнейших элементов ТЯР, лимитируемых, по существу, только свойствами этих материалов.
-
8. Отсутствием к настоящему времени сколько-нибудь детальной конструктивно-технологической проработки ТЯР....

ЦЕЛИ СОЗДАНИЯ МАЛОАКТИВИРУЕМЫХ КМ (МАКМ)

Малоактивируемый КМ (МАКМ): Спад Мощности Контактной Дозы (МКД) до уровня **10 мЗв/час** за время не более **100 годов** после облучения (разрешено рециклирование, повторное использование).

СОЗДАВАЕМЫЕ МАКМ (АО «ВНИИНМ»):

- 1) фер.-март. 12%Cr стали (Fe-12Cr-2W-V-Ta-B),
- 2) сплавы V-4Ti-4Cr, V-4Cr-(6-8)W(Ta)-(1-2)Zr.
- 3) аустенитные Cr-Mn стали (Fe-Cr-Mn-W-V-Ti-B).

ЦЕЛИ - СОЗДАТЬ МАКМ:

- = Функциональные свойства не уступают традиционным КМ (сильно-длительно радиоактивным).
- = Существенное улучшение условий эксплуатации реакторов:
 - минимизация паразитных потерь нейтронов,
 - повышение экономической эффективности (расширение температурных интервалов и увеличение длительностей топливных кампаний).
- = Минимизация радиоактивности. Существенное уменьшение радиационного влияния на окружающую среду «в процессе-после» эксплуатации реакторов.
- = Промышленное освоение МАКМ (изделий).

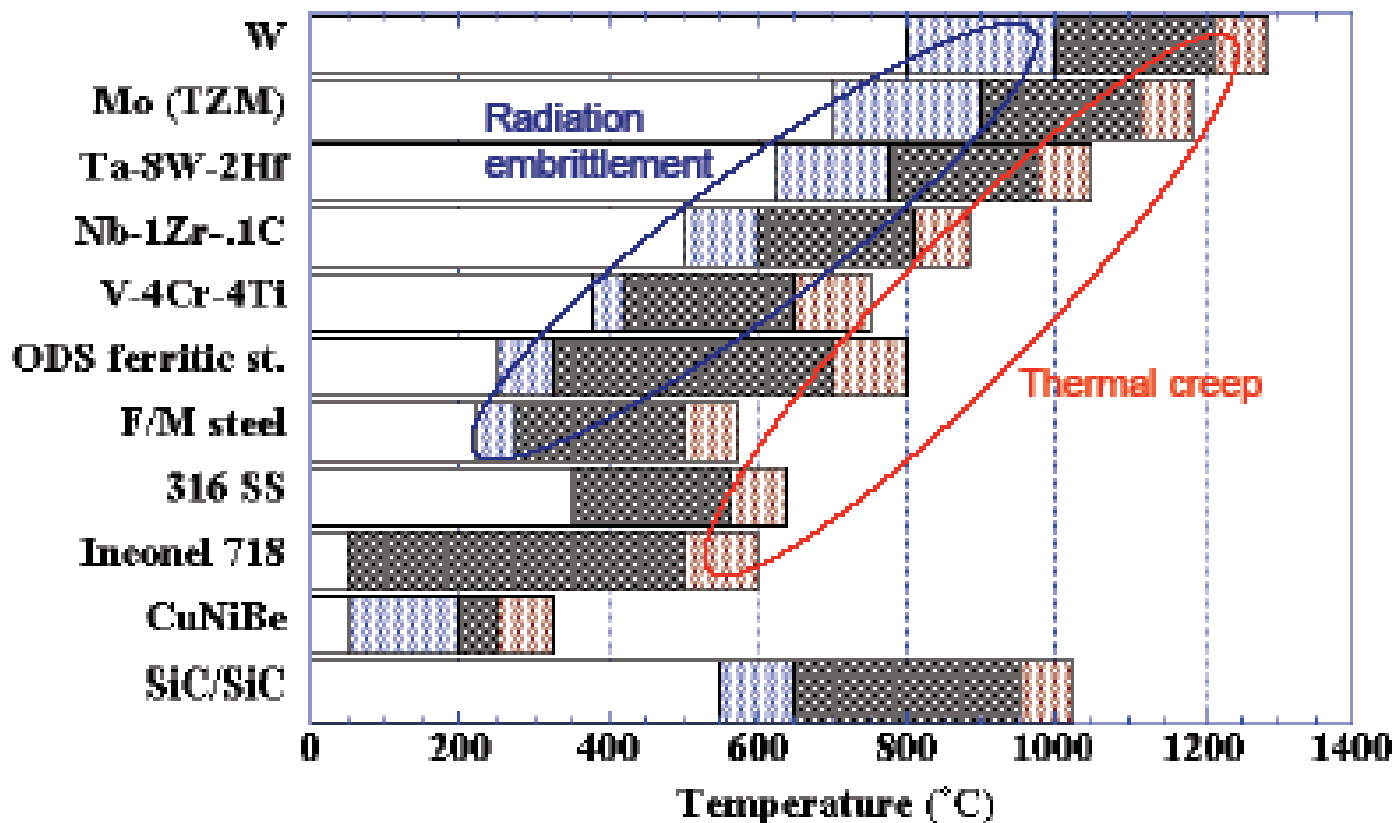
В значительной мере научные и технологические проблемы выбора, создания и направления дальнейших модификаций и производства МАКМ решены.

МЕЖДУНАРОДНАЯ КООРДИНАЦИЯ РАБОТ ПО МАКМ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ СПЕЦИАЛЬНЫМИ РАБОЧИМИ ГРУППАМИ МЭА (ФМС, Сплавы Ванадия).

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ РЕАКТОРНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ («ХЛАДНОЛОМКОСТЬ - ЖАРОПРОЧНОСТЬ»)

Conventional structural materials are capable of operation within ~300°C temperature window

Structural Material Operating Temperature Windows: 10-50 dpa



$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$$

Stresses.

Neutron spectra.

Radiation damage
(rate and dose).

Coolant (corrosion,
oxidation)

АО «ВНИИНМ» (2022 г.) : МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

МАКМ	Марка, Элементные составы, вес. %	Производство
Ферр.-март. 12%-Cr сталь	ЭК-181 (Fe-12Cr-2W-V-Ta-B) – RUSFER-EK181	Промышленное
МА Сплавы ванадия	ВМ-ДПЧ-9 : V-(4-5)Ti-(4-5)Cr	Опытное
	V-(4-5)Cr-(6-8)W(Ta)-(1-2) Zr-C-O	Разработка, Опытное
Аустенитная Cr-Mn сталь	Fe-(10-15)Cr-(20-30)Mn-2W-Ta-V-Ti-Zr-Si-B-C	Разработка. Опытное.

ДОПУСТИМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В КМ (ИЗДЕЛИЯХ)

Допустимые напряжения: минимальное значение одного из критических свойств КМ (изделия) для его безопасной эксплуатации (**запасов прочности**).

Нормы прочности для КМ (изделий) (США: ASME BVPC, РФ: РУАС НП-082-07):

КРИТИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ (МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА):

$$\sigma_D = \min \{ 0,7\sigma_{ys}, 0,25\sigma_{UTS}, \sigma_{t\delta}, 0,7\sigma_{tR} \}$$

σ_{ys} — предел текучести (min 200 МПа),

σ_{UTS} — предел прочности,

$\sigma_{t\delta}$ — напряжение для предела деформации (ползучести) δ за время t (длительность топливной кампании) при напряжении σ .

σ_{tR} — напряжение для разрыва за время нагружения t (длительность топливной кампании) при напряжении σ .

ВНУТРЕННИЕ (ТЕРМИЧЕСКИЕ) НАПРЯЖЕНИЯ (ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА)

$$\sigma_T = \{ E\alpha\Delta T / [2(1-\nu)] \} = E\alpha qd / [2\lambda(1-\nu)], \quad d = [2\lambda(1-\nu)]\sigma_T / (E\alpha q)$$

d — толщина КМ (изделия),

E — упругий модуль (Юнга),

ν — коэффициент Пуассона,

α — коэффициент теплового линейного расширения,

λ — теплопроводность,

$\Delta T = qd/\lambda$ — разность температур на границах изделия (внешней и внутренней сторонах изделия),

q — теплосъём с поверхности КМ (изделия).

Малоактивируемая Ферритно-мартенситная сталь ЭК-181 (Fe-12Cr-2W-V-Ta-B-C).

Применение: ТЯР (Pb-Li). Температуры 350—670(700) °С.

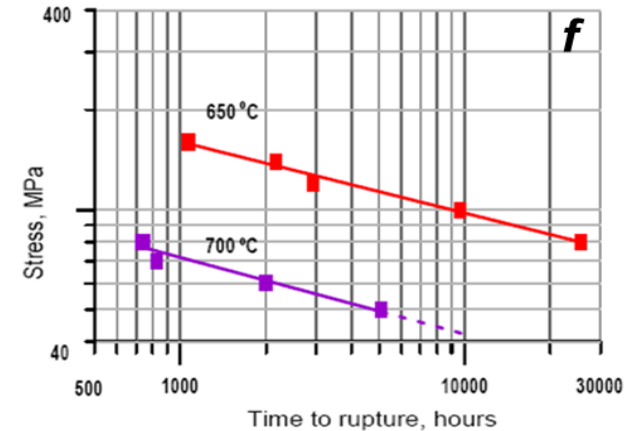
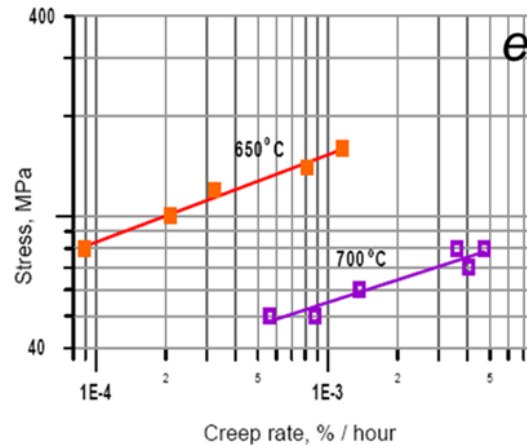
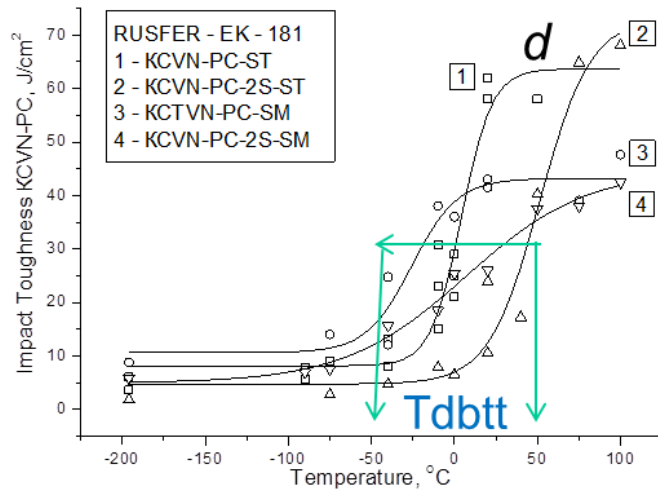
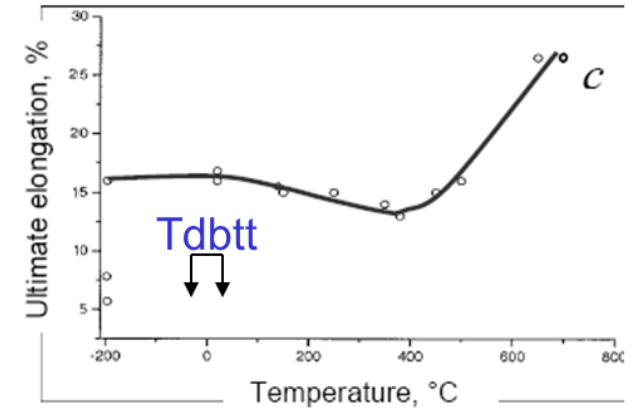
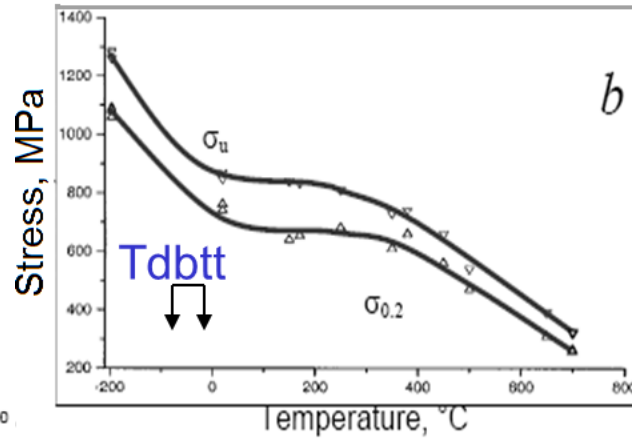
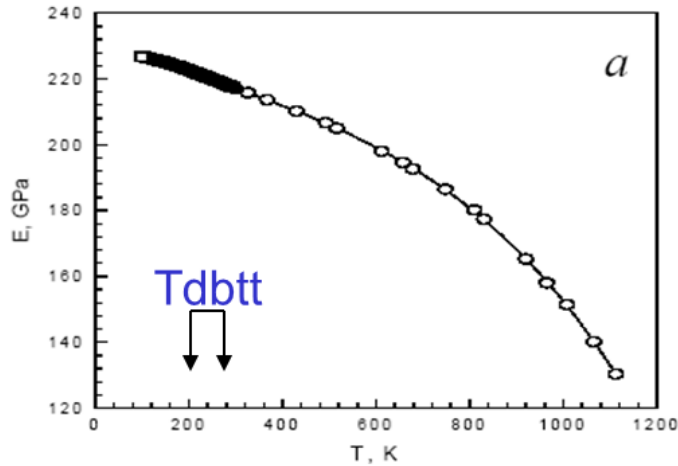
- + *Высокотехнологичная.*
- + *Нераспухающая (<200 сна).*
- + *Промышленное освоение.*
- *Невысокая температура плавления (1539 С).*
- *Полиморфизм (α - γ - δ фазы).*
- *Ферромагнетизм (проблема устойчивости конфигурации магнитного поля в ТЯР-ТОКАМАК).*

Сталь ЭК-181:

- практически не уступает по функциональным свойствам имеющимся (сильно-длительно активируемым) 12%-Cr фер.-март. сталям.
- существенно превосходит зарубежные (ЕС, Япония, США, Китай) малоактивируемые (9-12)%-Cr ферритно-мартенситные стали (EUROFER97, F82H, JLF-1, ORNL, CLAM).

**Созданная База Данных и промышленное освоение стали ЭК-181
в целом достаточны для применения этой стали в РФ- ДЕМО-ТЯР**

ФМС ЭК-181: Fe-12Cr-2W-V-Ta (ТТО). Механические Свойства



- (a) упругий модуль (E), (b) пределы текучести ($\sigma_{0.2}$) и прочности (σ_u),
 (c) полное удлинение до разрушения (%),
 (d) ударная вязкость для стандартных (ST) и малых (SM) образцов типа Шарпи с предварительной трещиной (PC) и двумя боковыми надрезами (2S),
 (e) скорость ползучести, (f) время до разрушения.

МАЛОАКТИВИРУЕМЫЙ V-4Ti-4Cr : РАЗРАБОТКА (1980 Г.), ПРОИЗВОДСТВО (США, ЯПОНИЯ, РФ, КИТАЙ, ФРАНЦИЯ).

Высокотехнологичный, Тугоплавкий (1910 °С), Нераспухающий, Неполиморфный, Немагнитный, Малая плотность (~ 6.1 г/см³), Жаропрочный, Жаростойкий. Высокая теплопроводность 30—40 Вт/(м К) (400—1300 К).

Применение (350—750 °С): теплоносители Li, Pb-Li, He.

Научные и технологические проблемы выбора, создания и направления дальнейших модификаций сплава V-4Ti-4Cr решены.

Реализация промышленных технологий получения больших слитков и требуемых изделий.

Вес слитков сплава V-4Ti-4Cr	Страна	Назначение - реакторы
500, 1200 кг	США	ТЯР (Li, Pb-Li)
30, 160 кг	Япония	ТЯР (Li, Pb-Li)
40, 110 кг	Россия (АО «ВНИИНМ»)	ТЯР (Li, Pb-Li), БН (Na, Pb)
30 кг	Китай	ТЯР (Li, Pb-Li)
30 кг	Франция	БН (Na, He)

АО «ВНИИНМ»: СПЛАВЫ ВАНАДИЯ – РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО.

СПЛАВЫ ВАНАДИЯ — РЕАЛЬНАЯ АЛЬТЕРНАТИВА ВСЕМ ТИПАМ СТАЛЕЙ

V-4Ti-4Cr (ВМ-ДПЧ-9): Опытное производство. Слитки 30—110 кг.

Сплав ВМ-ДПЧ-9 имеет мировую конкурентоспособность.

Созданные в АО «ВНИИНМ» новые режимы ТМО сплава (наноструктурирование) позволяют получить его функциональные свойства, существенно превосходящими свойства при стандартной ТМО.

V-Cr-W-Zr-Ta-C-O: Разработки, опытное производство. Слитки 1—15 кг.

Разработанные в АО «ВНИИНМ» технологии по изготовлению и переработке малоактивируемых сплавов ванадия могут быть внедрены в промышленность на базе уже имеющегося промышленного технологического оборудования (АО «ЧМЗ», необходимое время — 2 года).

Строится новый завод по производству металлического ванадия (2022 -2024 гг., Россия, Тульская область)

**Дисперсное упрочнение сплавов ванадия.
Методы термомеханической (ТМО) и химико-термической (ХТО)
обработок сплавов ванадия**

I Методы термомеханической обработки (ТМО) сплавов.

- Повышение эффективности дисперсного упрочнения наночастицами карбидных (ZrC) и оксикарбонитридных ($TiV-C-O$) фаз.

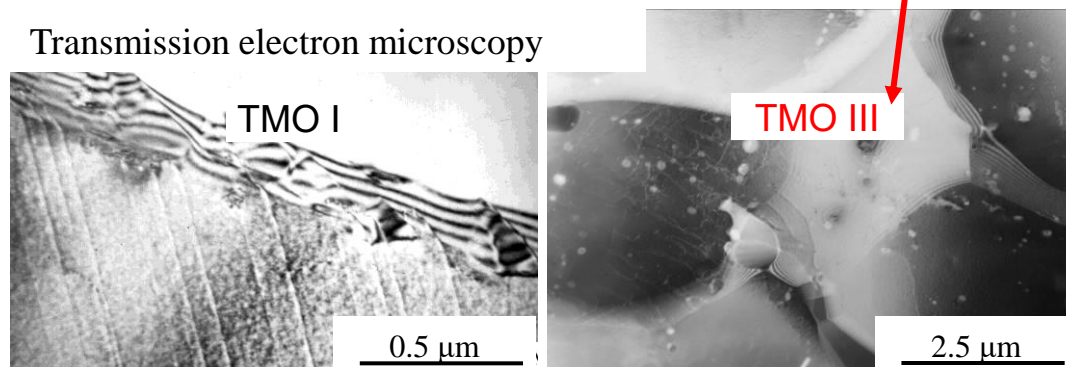
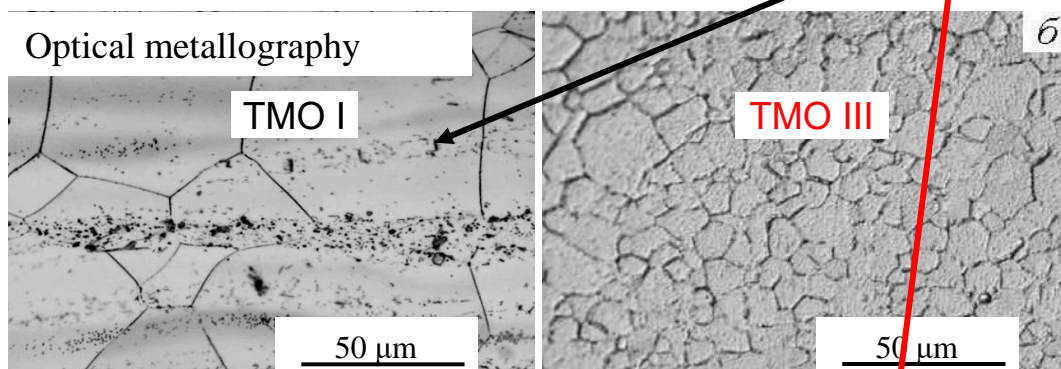
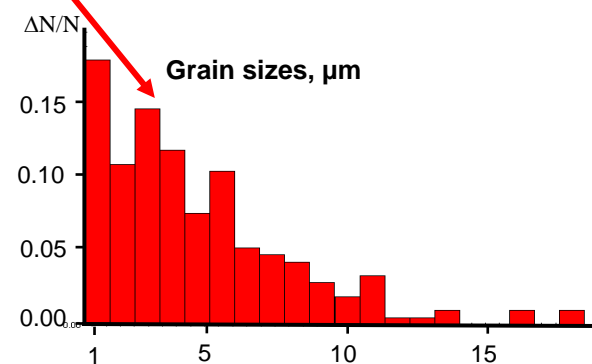
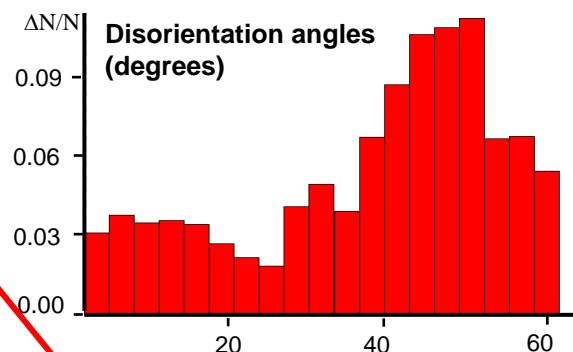
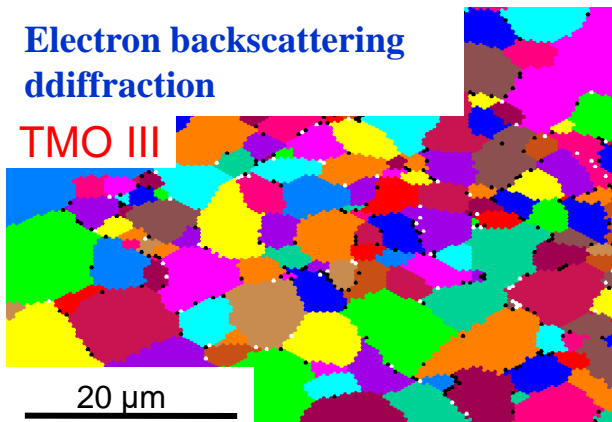
**II Методы химико-термической обработки (ХТО) сплавов -
неравновесное внутреннее окисление (ВО). Окисление легирующих
элементов с более высокой химической активностью к кислороду по
сравнению с матричным элементом.**

- Создание композиций сплавов с предельно высокой дисперсностью наночастиц оксида циркония (ZrO_2), стабильных до температур, близких к температуре плавления ванадия
- Дисперсное упрочнение на заключительной стадии технологической обработки полуфабрикатов и изделий.

Микроструктура сплава V-4Ti-4Cr после TMO I и TMO III

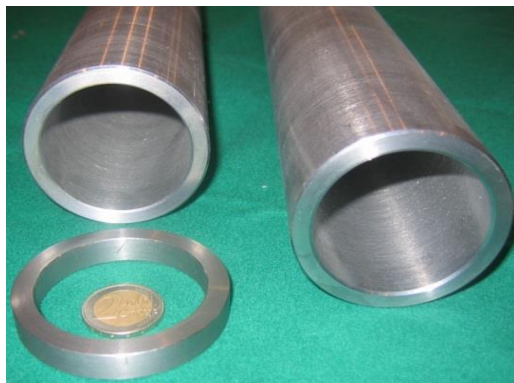
В условиях TMO (**TMO III**) с использованием больших пластических деформаций результатом высокой запасенной энергии деформации и увеличения количества центров зарождения новых зерен является значительное уменьшение их размеров после TMO.

Как следует из результатов EBSD-анализа, средний размер зерен после **TMO III** составляет $d \approx (3-5)$ мкм, что на порядок меньше, чем после TMO I - $d \approx (30-50)$ мкм.

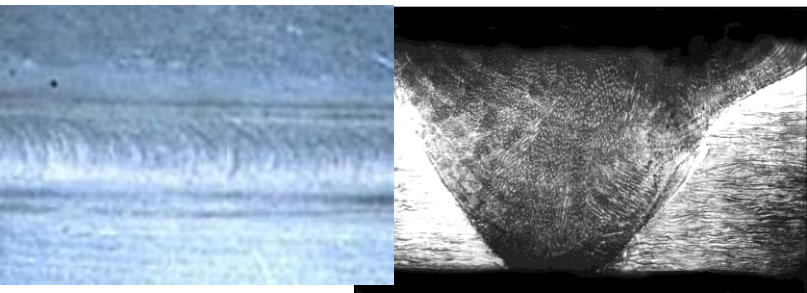


**ВМ-ДПЧ-9: V-4Ti-4Cr,
Слитки и изделия (АО «ВНИИНМ», ООО «ЭЛЕМАШ-СТП»):**

Слитки: 100—110 кг



**D 21 × 19 мм,
L 1—4 м**



Сварка листы 2—6 мм

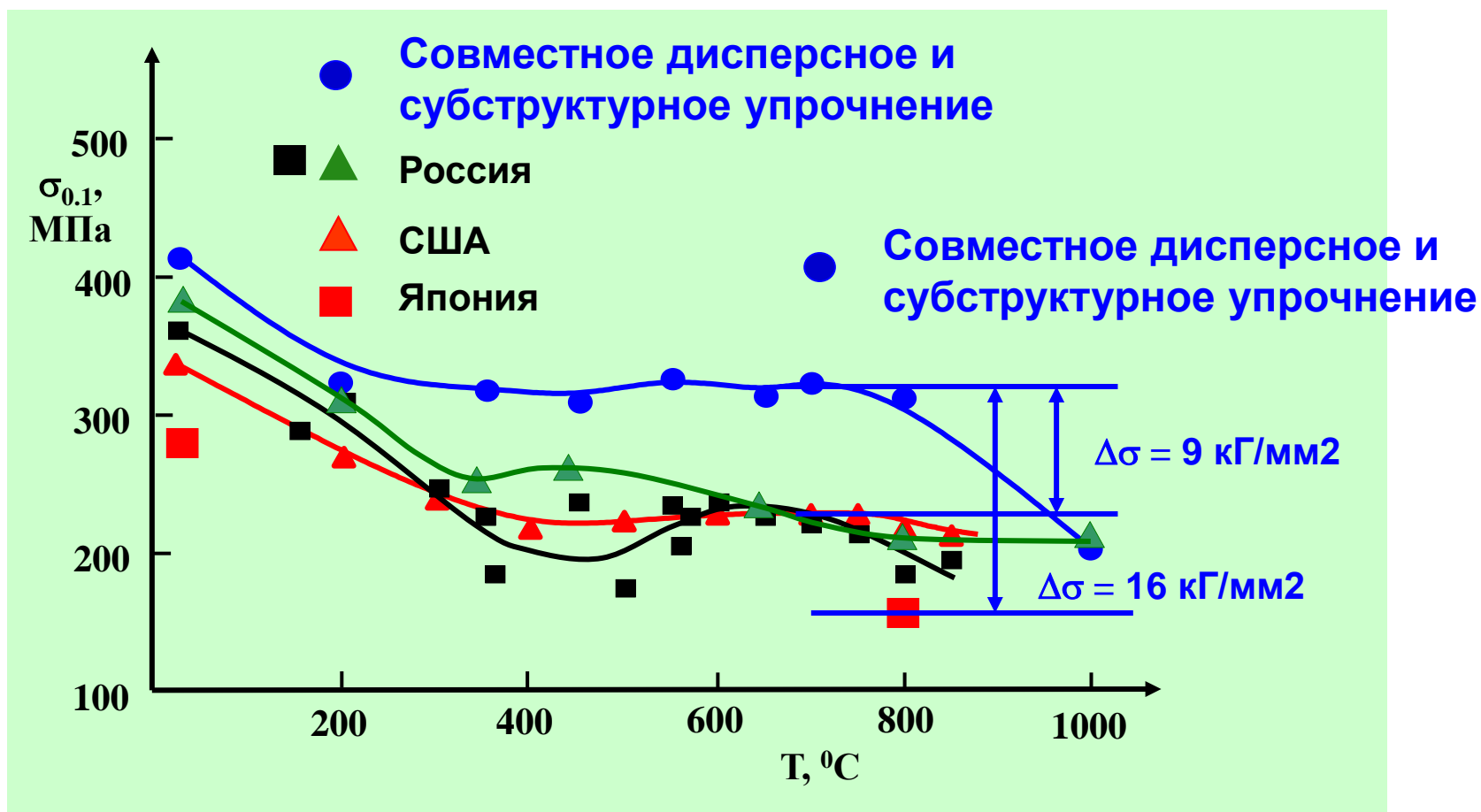
- листы до 1930 × 367 × 15 мм,
1500 × 257 × 80 мм
- трубы от 21 × 19 мм до 67 × 55 мм



**D 6,9 × 6,1 мм,
L 1—4 м**

ООО «ЭЛЕМАШ-СТП»

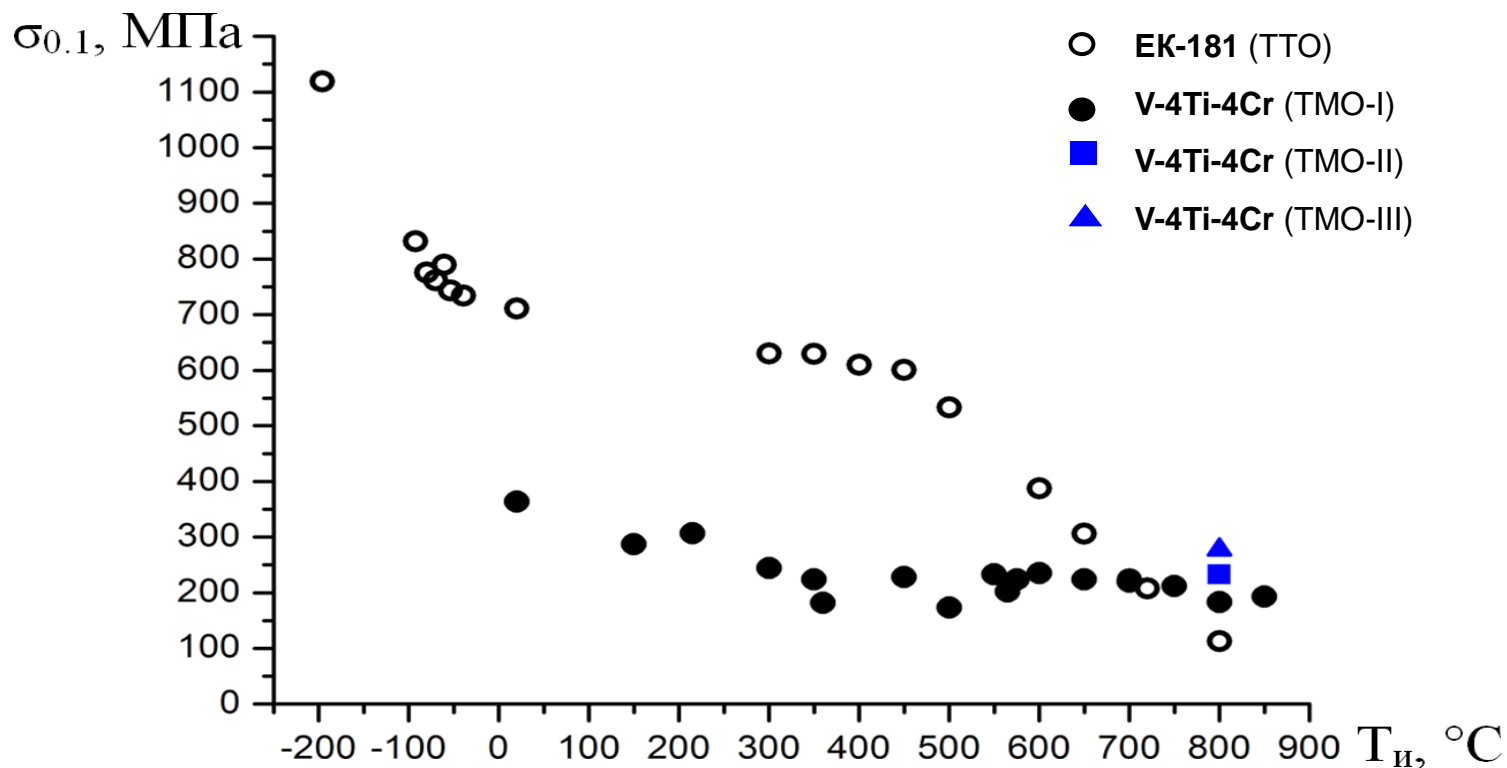
Температурные зависимости пределов текучести сплава V-4Ti-4Cr разных технологий (США, Япония, Россия)



■ ▲ ▲ ■ ТМО по штатным режимам (ТМО I, США, Япония, Россия)

● ТМО по режиму II (ТМО II, Россия)

ЭК-181, V-4Ti-4Cr. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРЕДЕЛОВ ТЕКУЧЕСТЕЙ



ЭК-181 – V-4Ti-4Cr: Пределы текучести для разных режимов ТТО и ТМО.

ТТО – традиционный режим термообработки стали.

ТМО-I – традиционный режим обработки сплава.

ТМО-II – наноструктурирование гетерофазной структуры с увеличением объемного содержания наноразмерных частиц TiV(C,O,N) и ZrC.

ТМО – III - наноструктурирование гетерофазной структуры с применением больших пластических деформаций и высокими эффектами совместного дисперсного и субструктурного упрочнения.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МА КМ (ФМС ЭК-181, сплав V-4Ti-4Cr)

Критические напряжения определяют длительности топливных кампаний

	ЭК-181		V-4Ti-4Cr Россия		V-4Ti-4Cr США, Япония	
	650 °C	700 °C	650 °C	700 °C	650 °C	700 °C
T, °C						
σ_{ys}, МПа	320	260	230	225	220	220
σ_{UTS}, МПа	390	320	390	390	380	380
$\sigma_{1\%}$, МПа						100
$\sigma_{t\delta}$, МПа						
σ_{tR}, МПа	t = 10⁴ ч	95	42	180	140 100 (750 °C)	
	t = 3·10⁴ ч	80				

σ_{ys} — предел текучести,

σ_{UTS} — предел прочности,

$\sigma_{1\%}$ — напряжение для достижения 1% деформации ползучести за 100 000 ч

σ_{tR} — напряжение для разрыва за t часов испытаний

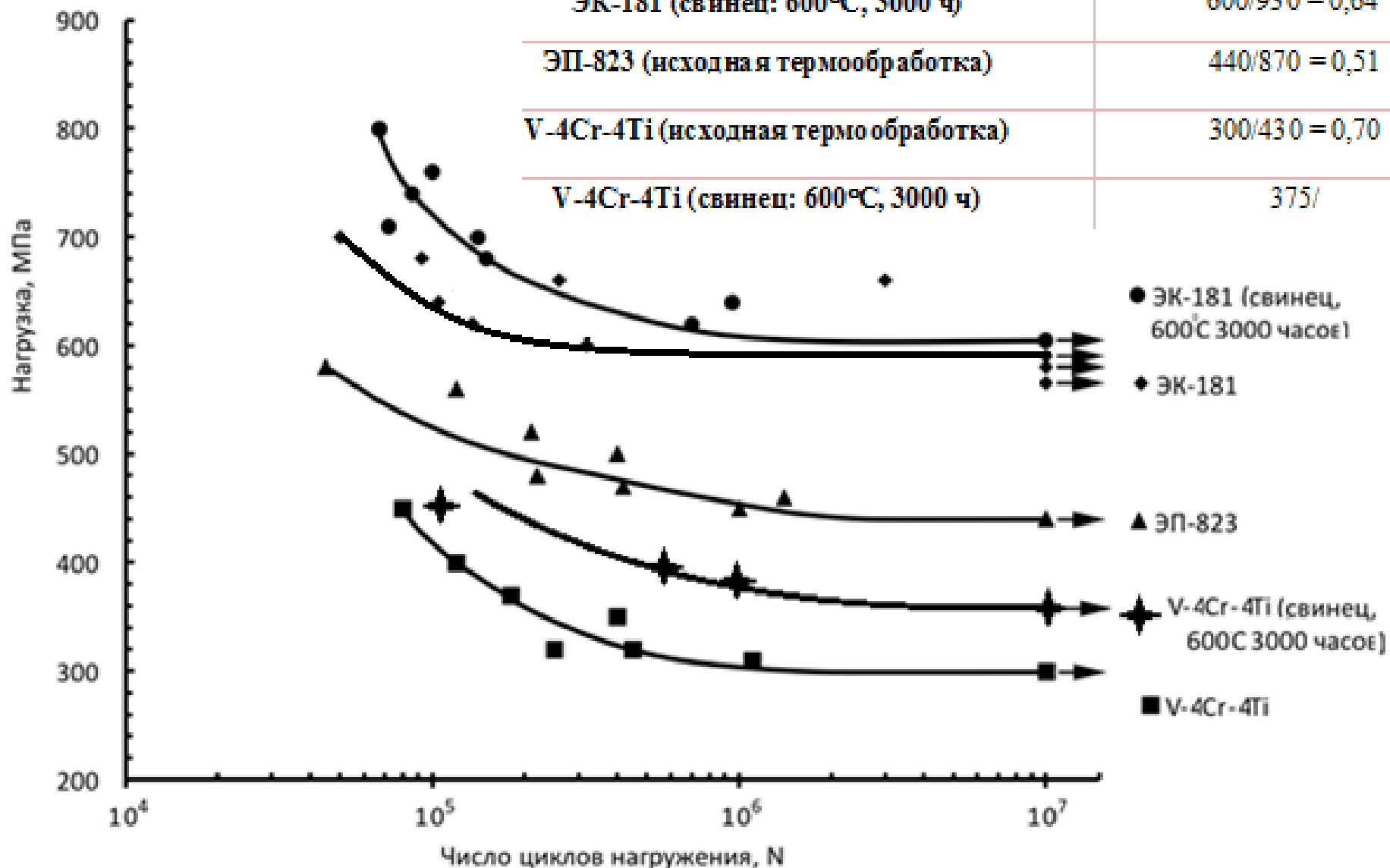
$\sigma_{t\delta}$ — напряжение для предела деформации δ (конструкция) за время t (длительность топливной кампании)

$$\sigma_D = \min \{ 0,7\sigma_{ys}, 0,25\sigma_{UTS}, \sigma_{t\delta}, 0,7\sigma_{tR} \}$$

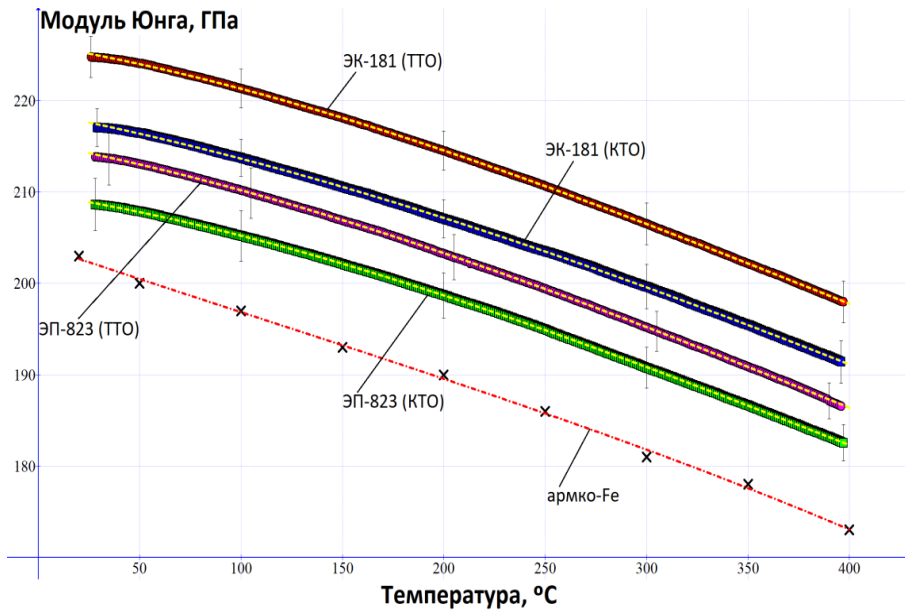
УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ФМС СТАЛЕЙ И СПЛАВА V-4Ti-4Cr

Усталостные
испытания при 20 °С

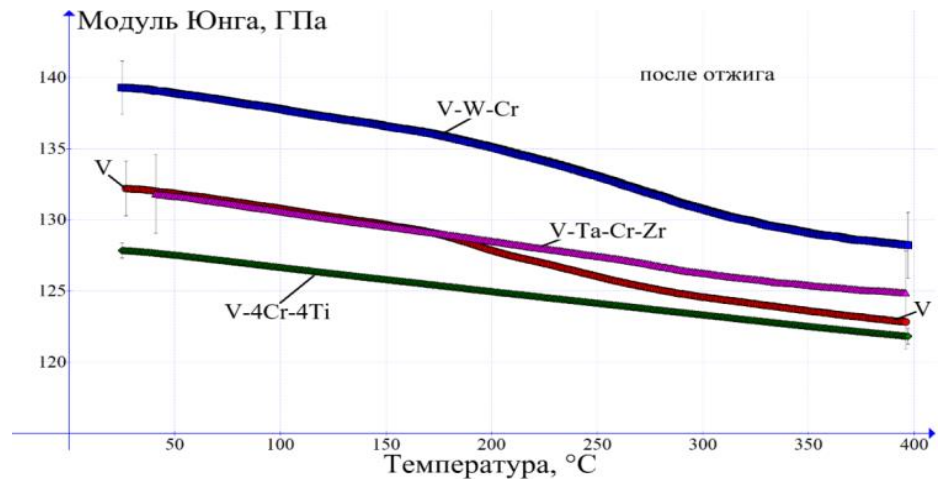
Материал	$\sigma_{уст} / \sigma_B$, МПа
ЭК-181 (исходная термообработка)	590/931 = 0,63
ЭК-181 (свинец: 600°С, 3000 ч)	600/930 = 0,64
ЭП-823 (исходная термообработка)	440/870 = 0,51
V-4Cr-4Ti (исходная термо обработка)	300/430 = 0,70
V-4Cr-4Ti (свинец: 600°С, 3000 ч)	375/



ФМС ЭК-181, ЭП-823, α -Fe, V, V-Cr-W(Ta)-Zr ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ УПРУГОГО МОДУЛЯ (ЮНГА)

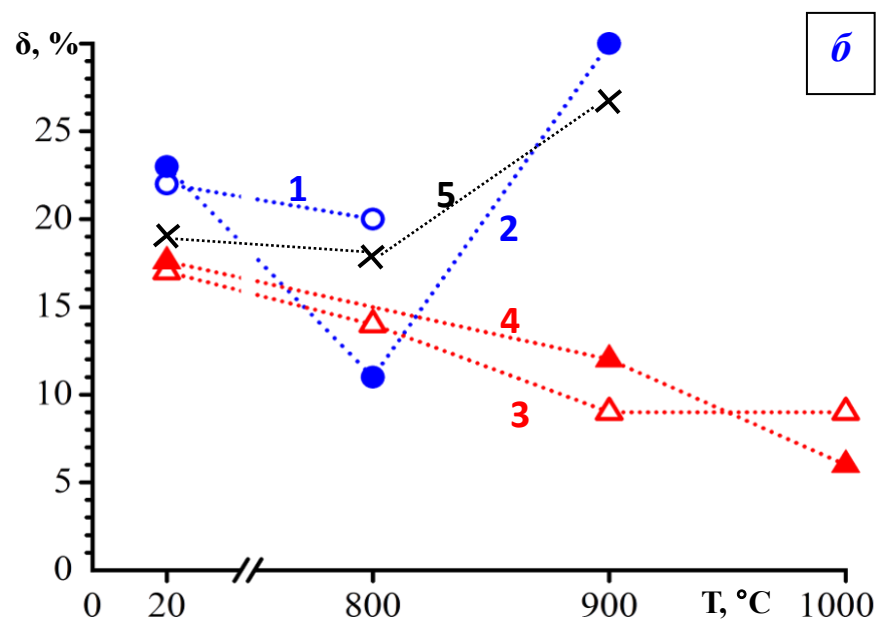
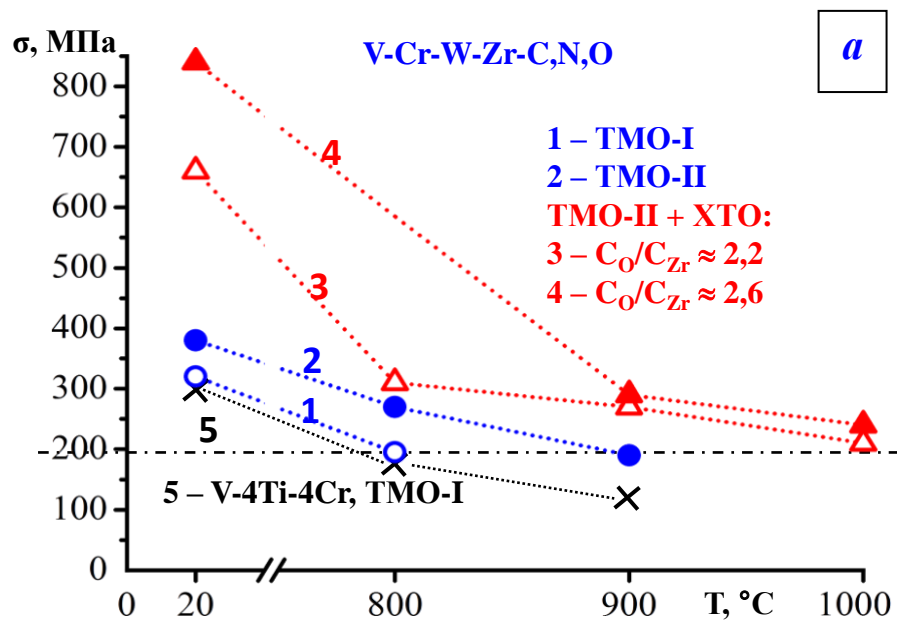


Температурные зависимости упругих модулей ФМС (ЭК-181, ЭП-823) разных ТО (ТТО, КТО) и α -Fe



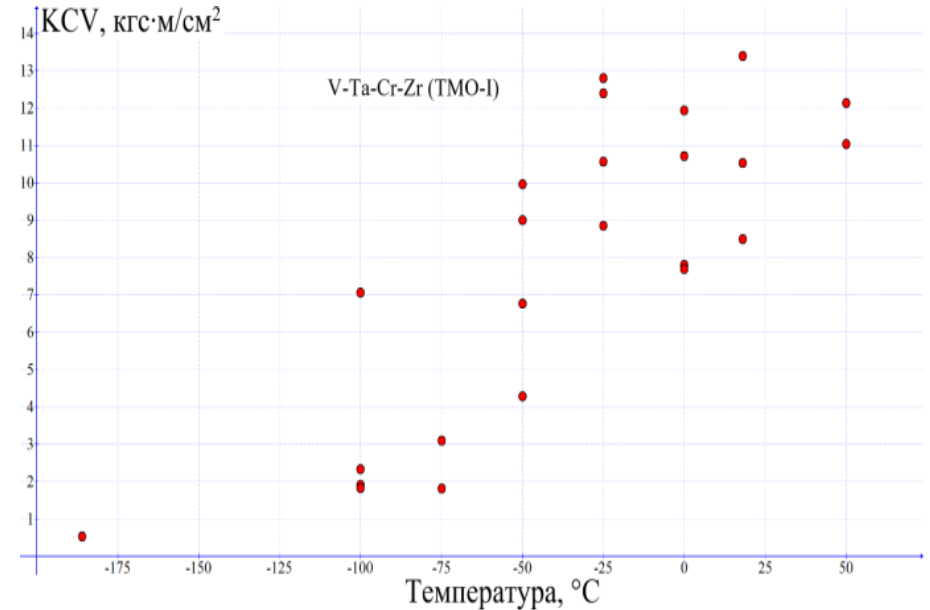
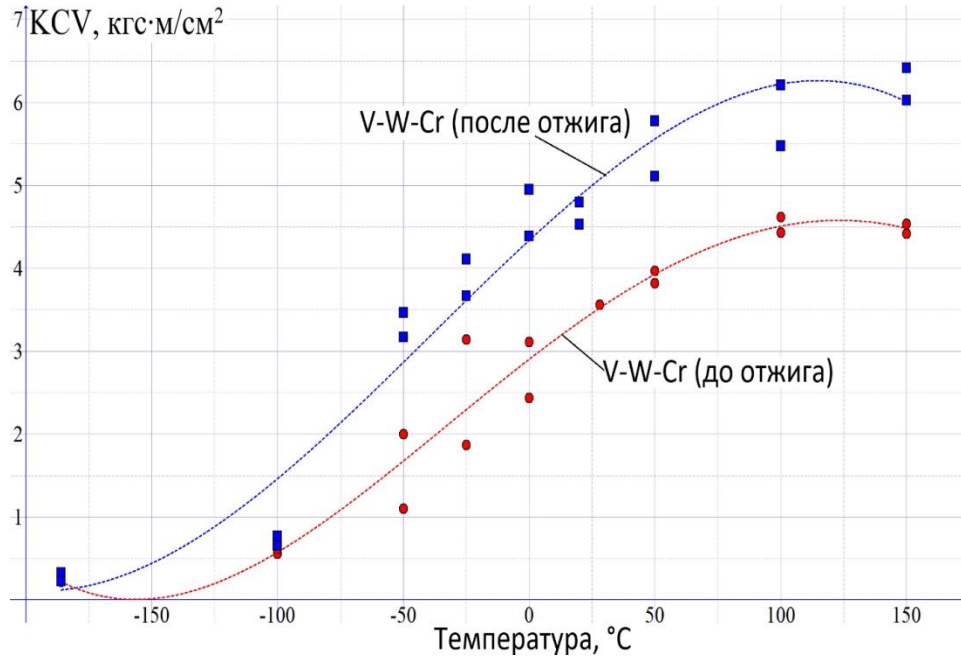
Температурные зависимости упругих модулей (Юнга) V и его сплавов

V-4Ti-4Cr, V-Cr-W-Zr. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРЕДЕЛОВ ТЕКУЧЕСТЕЙ



Пределы текучести (а) и относительные удлинения до разрушения (б) сплавов V-Cr-W-Zr-(C, N, O) (1-4) и V-4Ti-4Cr (5) после обработок по режимам ТМО-I (1, 5), ТМО-II (2) и ТМО-II + ХТО при разных соотношениях концентрации кислорода и циркония. $C_O/C_{Zr} \approx 2,2$ (3) и 2.6 (4).

ХЛАДНОЛОМКОСТЬ V-Cr-W(Ta)-Zr ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ (Малые образцы Шарпи)



V-Cr-W-Zr до (ХД) и после отжига

Хрупкое разрушение при температурах < -150 С

V-Cr-Ta-Zr после отжига

Хрупкое разрушение при температурах < -150 С

СПЛАВЫ V-4Ti-4Cr, V-Cr-W(Ta)-Zr – ВНЕШНЯЯ СРЕДА. КОРРОЗИЯ, МГД-ЭФФЕКТ

Внешняя среда: Li, Pb-Li.

Требования:

Сплавы – коррозионностойкие.

Покрyтия (МГД-эффект) - коррозионностойкие, электроизолирующие,
- антитритиевые (уменьшение утечек трития из теплоносителя),

- Качество (чистота) теплоносителей (контроль O, N).

- Дополнительное легирование сплава V-4Cr-4Ti (Si, др.) (улучшение коррозионной стойкости),

- Коррозионно-стойкие сплавы V-Cr-W(Ta)-Zr.

- Электроизолирующие (самовосстанавливающиеся) покрытия : CaO, Er₂O₃, Y₂O₃, VSi.

Сплавы V-Cr-W(Ta)-Zr существенно более коррозионностойкие, чем сплав V-4Ti-4Cr.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КМ «ДО-В ПРОЦЕССЕ-ПОСЛЕ» РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ (НЕЙТРОННОГО, ГАММА)

Состояния структуры (степени равновесности) КМ «до-в процессе-после» реакторного облучения существенно различны.

Реакторное облучение (**дефектообразующее, ионизирующее**) создаёт в КМ неравновесное динамическое состояние (открытая система), свойства которого отличны от состояний КМ «до-после» облучения.

«В процессе» облучения возникают далекодействующие динамические волны упругих смещений и напряжений (**«радиационная тряска»**), которые значительно влияют на эволюции микроструктуры и свойств КМ.

РЕАКТОРНОЕ ОБЛУЧЕНИЕ ВЫЗЫВАЕТ В МЕТАЛЛАХ (ЭКСПЕРИМЕНТ):

(1) «После облучения» (температура ниже 500 С) прочность увеличивается (НТРО - Низко-Температурное Радиационное Охрупчивание).

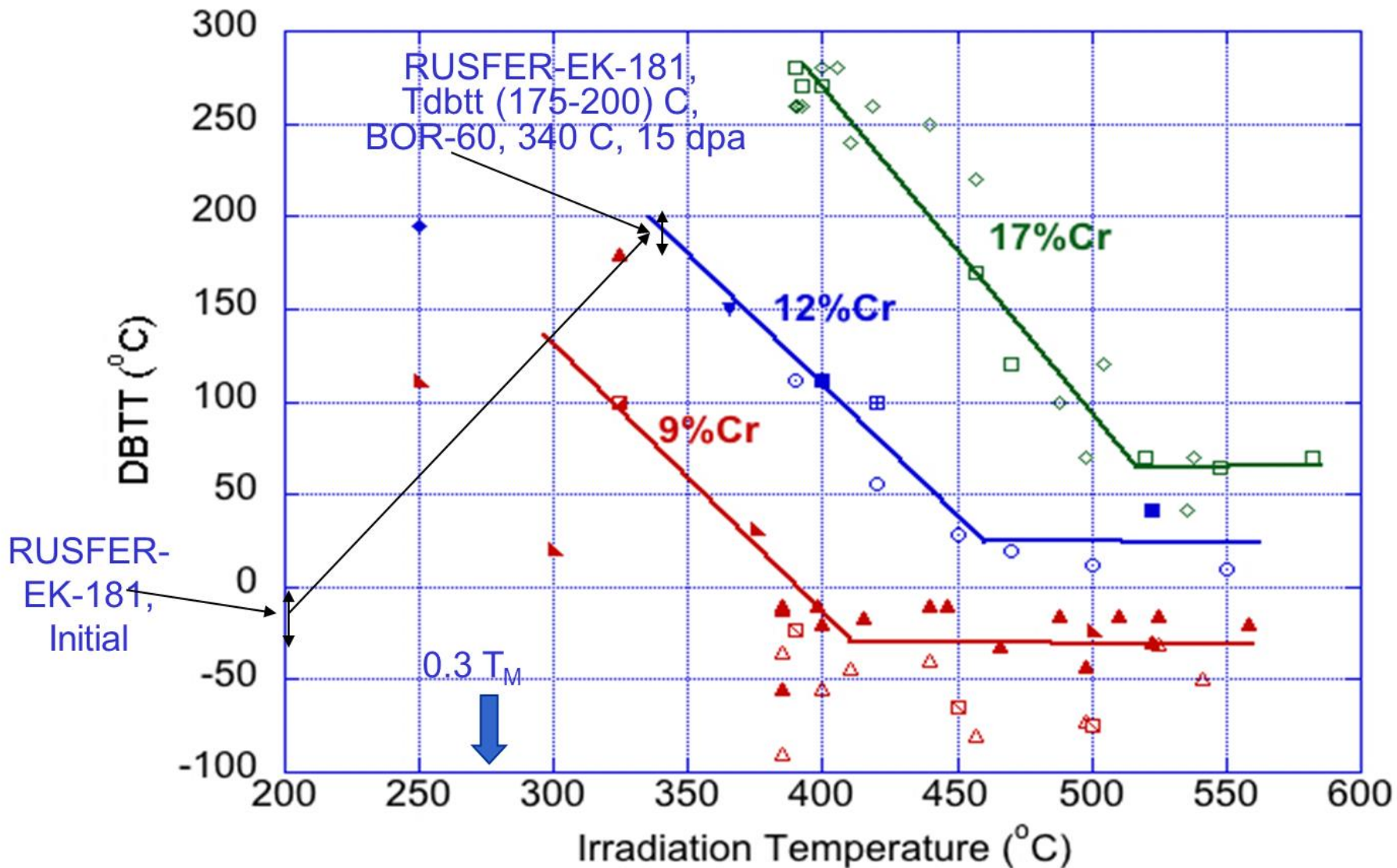
(2) «В процессе» облучения:

- прочность уменьшается.
- упругие модули уменьшаются.
- возникает радиационная ползучесть (в отсутствие тепловой ползучести).
- выше поток нейтронов – выше скорость радиационной ползучести.
- скорость радиационной ползучести слабо зависит от дозы облучения.

**СУЩЕСТВЕННЫЕ РАЗЛИЧИЯ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ КМ В БР и ТЯР.
ТРЕБУЮТСЯ ИСТОЧНИКИ ОБЛУЧЕНИЙ - ТЯР.**

ВЛИЯНИЕ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ХЛАДНОЛОМКОСТЬ ФМС (Температура вязко-хрупкого перехода DBTT). БЫСТРЫЕ РЕАКТОРЫ, ДОЗЫ 15-30 СНА, ПОСЛЕРЕАКТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

after S, J. Zinkle (2010), Boutard et al., C.R. Physique. 9 (2008) 287 and Klueh & Harries (2001)



НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ РАДИАЦИОННАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ КМ (Быстрые Реакторы, НЕТ ТЕПЛОВОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ, $T_{обл} < 500 \text{ C}$)

Модуль радиационной ползучести $B = \varepsilon/(\sigma D)$
(ε – деформация, σ – напряжение, D – радиационная повреждаемость)

	КМ	$B, 10^{-6} \text{ МПа}^{-1} \text{ сн}^{-1}$
1	Фер.-март. стали (8—12 % Cr)	0,15—1,00
2	ДУО-Фер.-март. стали ($\text{TiO}_2, \text{Y}_2\text{O}_3$)	0,10—0,75
3	Аустен. стали	1,00—4,00
4	V-4Ti-4Cr	1,40—10,00

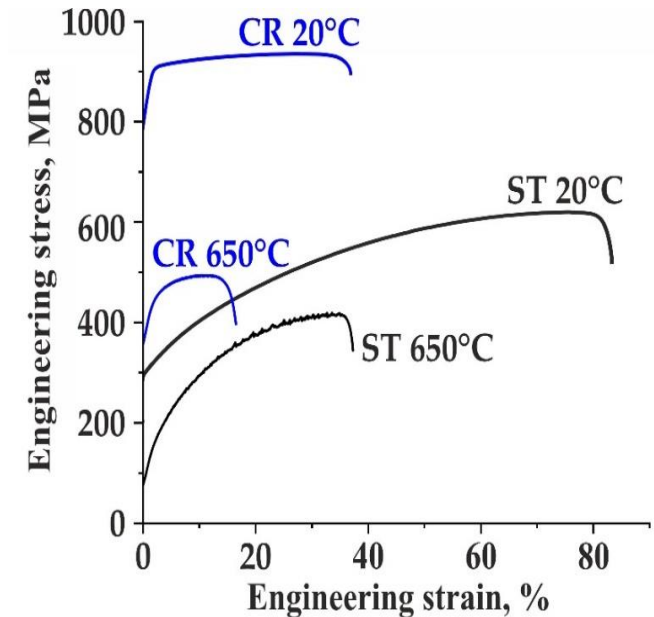
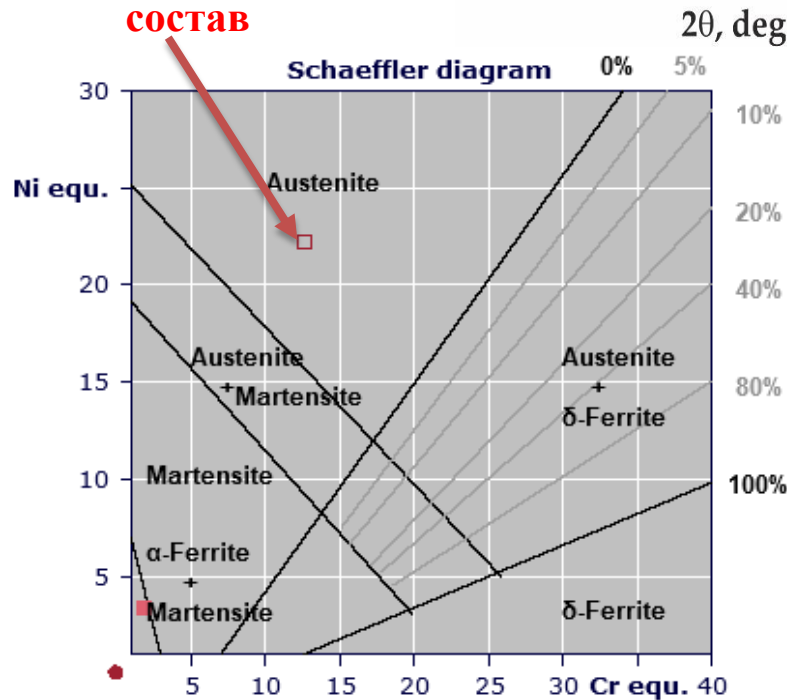
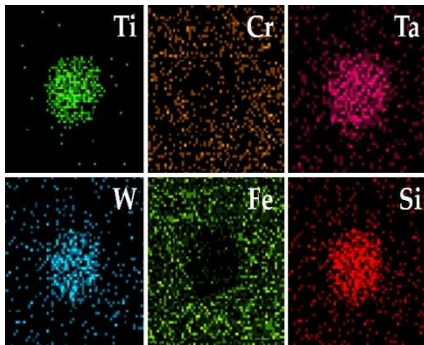
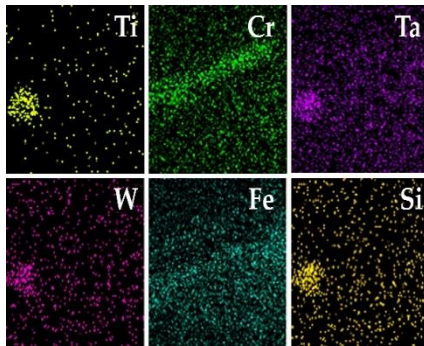
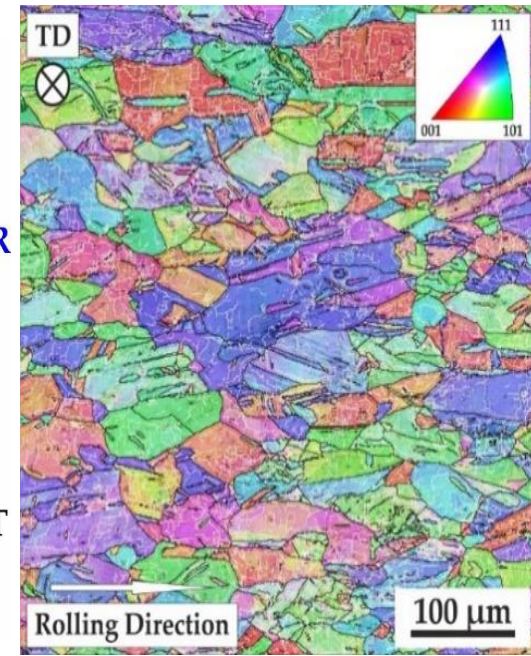
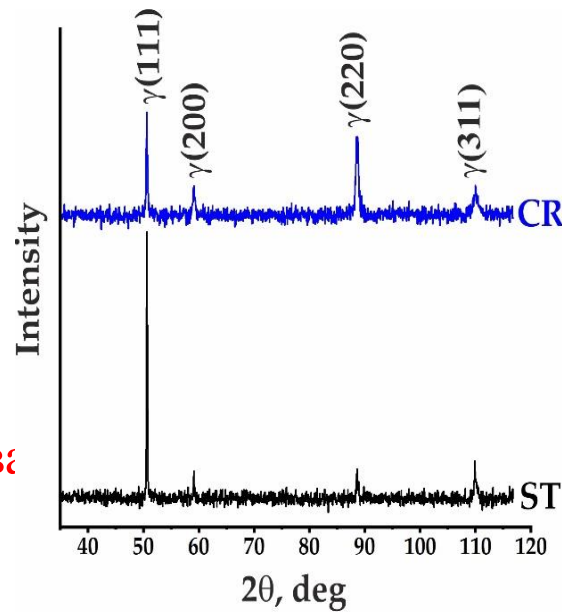
**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ РАДИАЦИОННАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ
ПОДАВЛЯЕТ ФОРМИРОВАНИЕ ХЛАДНОЛОМКОСТИ КМ.**

В ПРОЦЕССЕ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НЕТ ХЛАДНОЛОМКОСТИ КМ

Малоактивируемая аустенитная Cr-Mn-сталь (опытные плавки): Fe-29Mn-12Cr-1.4W-Si-Ta-Ti-V- -Zr-0.25C (вес. %)

Повышенная стабильность аустенита.
Дисперсное и субструктурное упрочнения.

Микроструктура и механические свойства:

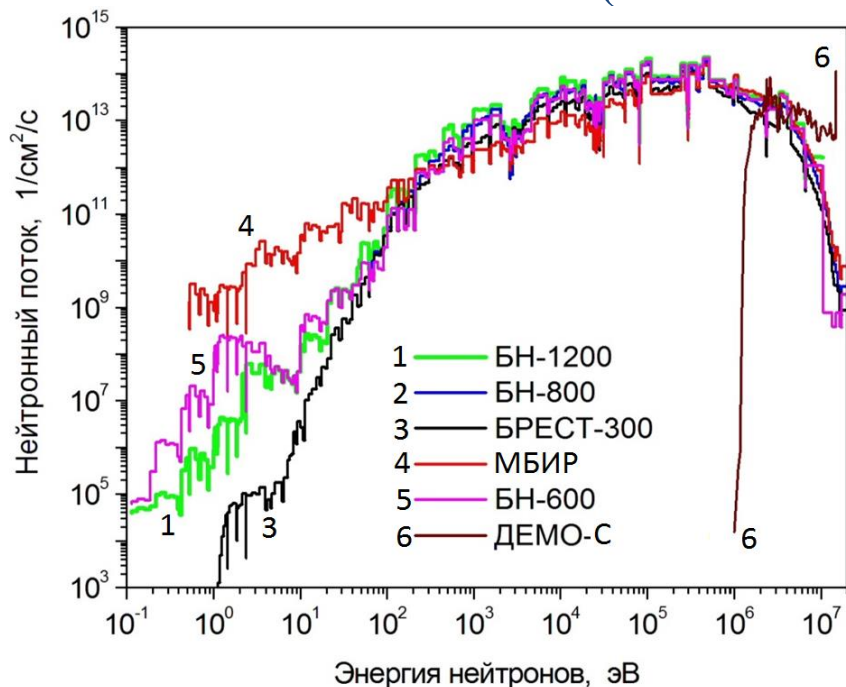


Карбиды MC и M₂₃C₆

Низкая ЭДУ = 25 мДж/м² – склонность к двойникованию

НЕЙТРОНИКА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ. Нейтронные спектры.

Расчётный Комплекс ядерно-физических свойств АСДАМ-2.0 (ВНИИНМ, ФЭИ, ИБРАЭ РАН)



“АСДАМ-2.0”, endf-6 формат МАГАТЭ

Исходные данные:

- нейтронный спектр (10^{-5} эВ – 20 МэВ),
- элементный и изотопный состав КМ ($A=1-252, Z < 92$),
- режим облучения,
- время охлаждения после облучения.

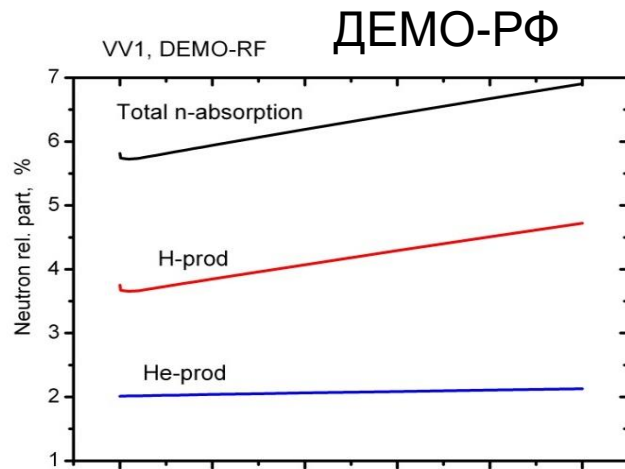
Расчёты:

- **первичная радиационная повреждаемость** (сна-NRT-IAEA),
- все известные ядерные реакции,
- ядерные реакции всех порядков,
- активация,
- трансмутация,
- радиоактивность (Бк),
- мощность эквивалентной дозы (Зв/час),
- энерговыделение при облучении (Вт/кг),
- энерговыделение после облучения (Вт/кг).
- изотопные вклады.
- расход (поглощение) нейтронов.

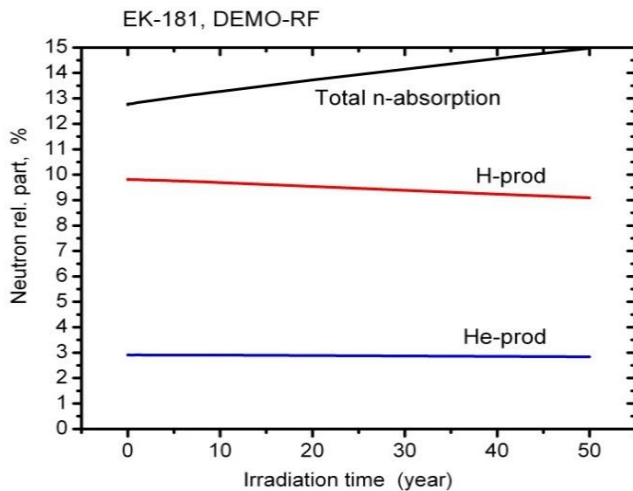
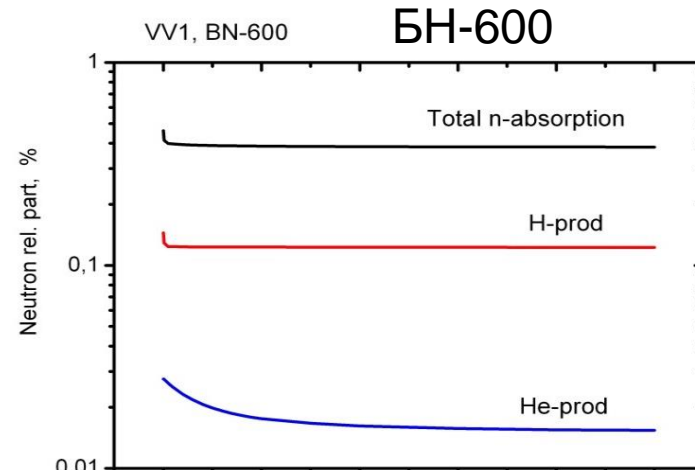
Реактор	Поток n, E > 0, 1 МэВ (см ² /с)	Доля n, E > 13,5 МэВ, %	ПРП, сна/год	
			Fe	V
БН-600	$6.5 \cdot 10^{15}$	0.00015	62,24	79,58
БН-800	$5.82 \cdot 10^{15}$	0.0016	54,42	71,25
БН-1200	$7.68 \cdot 10^{15}$	0.0021	71,46	94,04
БРЕСТ-300	$3.97 \cdot 10^{15}$	0.00096	37,26	48,62
МБИР	$4.0 \cdot 10^{15}$	0.0041		
РФ-ДЕМО (ДЕМО-С)	$9.0 \cdot 10^{14}$	14.44	47,77	48,08

V-4Ti-4Cr (VV1) и ЭК-181 (РУСФЕР-ЭК-181).

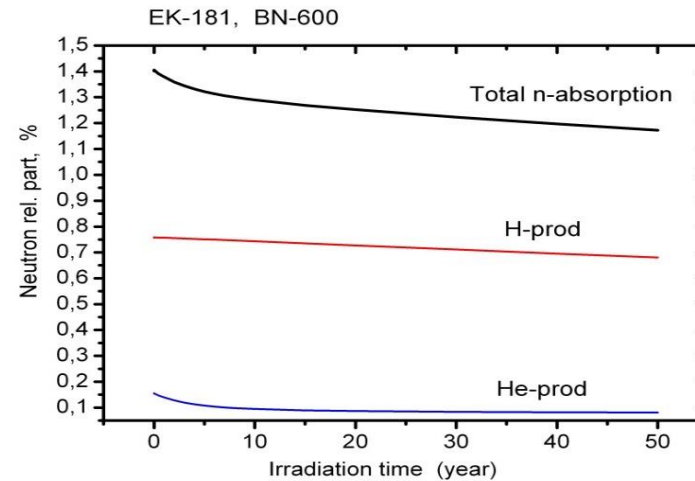
ПОГЛОЩЕНИЕ НЕЙТРОНОВ НА ГАЗООБРАЗОВАНИЕ (H, He) И ПОЛНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРАХ БН-600 И ДЕМО-РФ



V-4Ti-4Cr



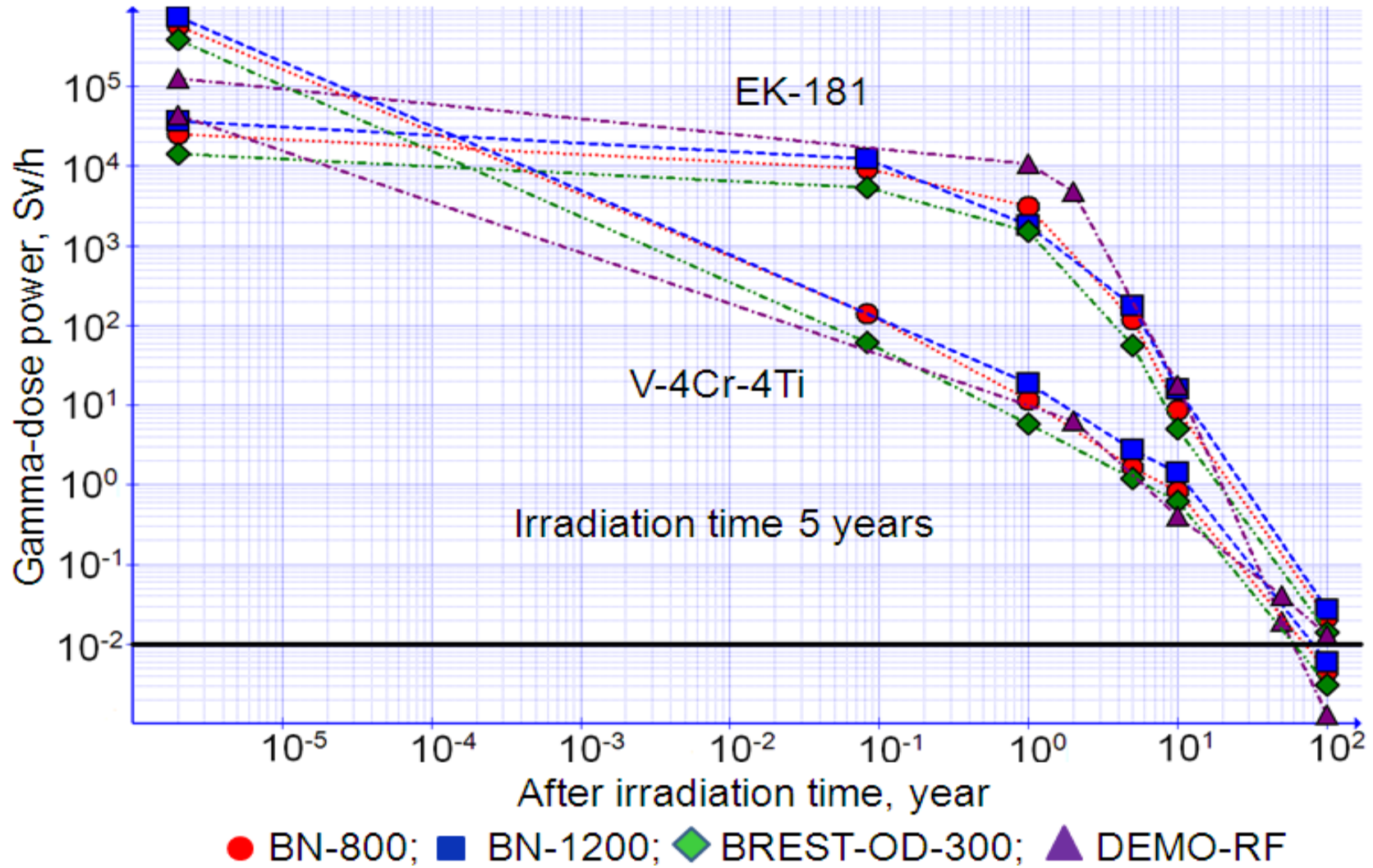
ЭК-181



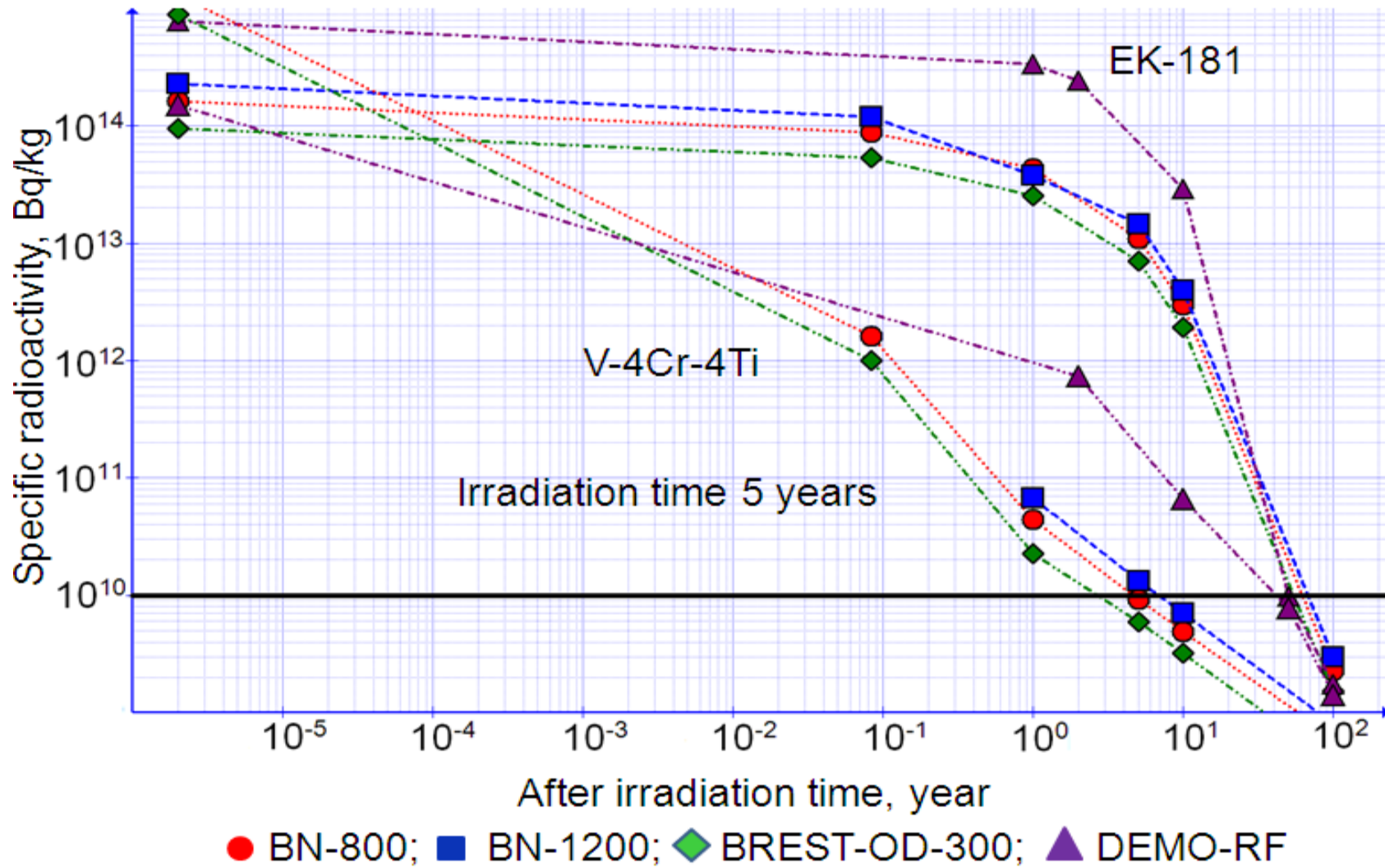
Поглощение нейтронов (%) для ядерной наработки H&He и полное поглощение нейтронов в реакторах ДЕМО-РФ ($9.0 \cdot 10^{14}$ н/см²/с) и БН-600 ($6.5 \cdot 10^{15}$ н/см²/с)

ФМС ЭК-181, V-4Cr-4Ti.

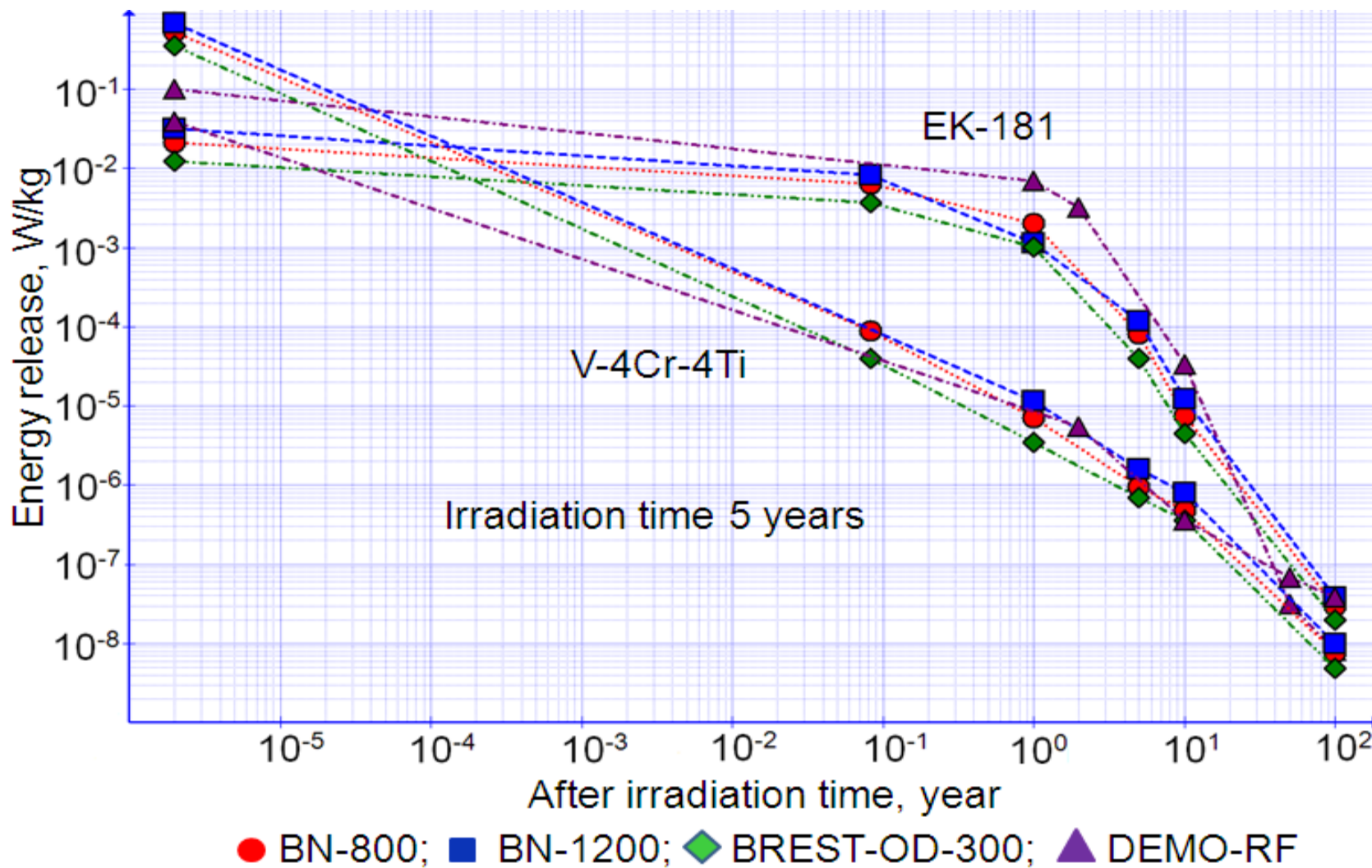
Мощность эквивалентной гамма дозы (время облучения 5 годов)



ФМС ЭК-181, V-4Cr-4Ti.
Радиоактивность (время облучения 5 годов)



ФМС ЭК-181, V-4Cr-4Ti.
Ядерное энерговыделение (время облучения 5 годов)



ЭК-181, V-4Ti-4Cr (ВМ-ДПЧ-9): Радиоактивные изотопы, определяющие ядерные физические свойства к концу нейтронного облучения длительностью 5 годов в БР и ДЕМО-ТЯР через 100 годов после облучения

	БН-800, БН-1200, БРЕСТ-ОД-300		РФ-ДЕМО	
	облучение 5 годов	100 годов после облучения	облучение 5 годов	100 годов после облучения
ЭК-181	Mn56, Mn54, Ta182, V52, W187, Fe55, W185, Re186	Nb94, Co60, Nb93m, Mo93, Ni59, C14 , Ni63, Ir192	Mn56, Mn54, V52, Al28, Zr90m, Fe55, Cr51, Mn57	Bi207, Al26, Nb94, Hf178m2, Nb91, Ni63, C14 , H3, Nb93m
V-4Ti-4Cr	V52, Ti51, Sc48, Sc46, Al28, Cr51, Sc47, Cu64	Nb94, Ag108m, Co60, Nb93m, Mo93, C14 , Ni63, Ar39	Sc48, V52, Ti51, Sc46, Al28, Cr51, Sc47	Eu150, Ag108m, Eu152, K42, Nb94, Ag39, H3, C14 , Sm151, Ni63

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 1(2)

МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ РФ-ДЕМО - ТЯР

РФ-ДЕМО-ТЯР должен быть построен (2050+ г.).

МАКМ потенциально имеются (АО «ВНИИНМ»):

ФМС 12%Cr ЭК-181, Сплавы V-4Ti-4Cr, V-Cr-W(Ta)-Zr, Аустенитная Cr-Mn сталь.

ОПРЕДЕЛИТЬ ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ (ИЗДЕЛИЯМ) ДЛЯ РФ-ДЕМО - ТЯР:

- РЕЖИМ ЭКСПЛУАТАЦИИ (ИМПУЛЬСНЫЙ, НЕПРЕРЫВНЫЙ). РАДИОАКТИВНОСТЬ, ПРЕДЕЛЬНОЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ (РАСПУХАНИЕ, ДЕФОРМАЦИЯ). ТЕМПЕРАТУРЫ. ТОПЛИВНАЯ КАМПАНИЯ, ТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЕ, ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ
 - СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ МАКМ (ИЗДЕЛИЙ) С ОРИЕНТАЦИЕЙ НА ПРОЕКТЫ РФ-ДЕМО - ТЯР.
 - ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УРОВНИ ГОТОВНОСТИ МАКМ (ИЗДЕЛИЙ).
-

ПЛАНИРУЕМЫЕ УСТАНОВКИ (ТРТ, ГИБРИДНЫЕ, др.) ДОЛЖНЫ ИСПОЛЬЗОВАТЬ МАКМ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛЕЗНЫЕ ДЛЯ РФ-ДЕМО-ТЯР

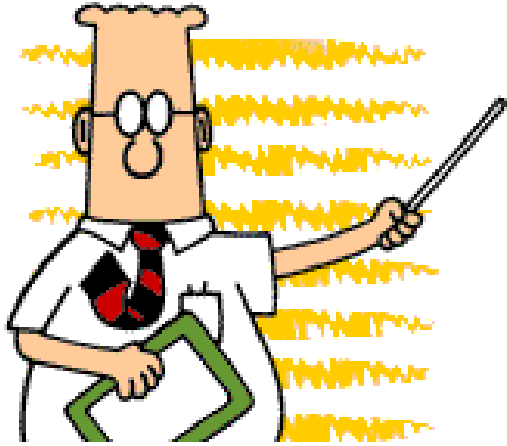
НУЖНЫ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ СТЕНДЫ:

ФЭИ (Li, Pb) - имеются, НИИАР (МБИР), ИРМ (ИВВ-2М),

НУЖНЫ ИСТОЧНИКИ ТЕНМОЯДЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ

IFMIF (МЭА, Япония), IFMIF-DONES (EU, Испания), Россия (?)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 2(2)



«Наука, Материалы и Энергия определяли могущество
Минсредмаша и Минатома» (Е. Славский)

**НУЖНА СПЕЦИАЛЬНАЯ ПРОГРАММА ГК «РОСАТОМ» -
МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗАРУБЕЖНЫЕ ПРОГРАММЫ:

Fusion Materials Program :

- USA (DOE, ORNL),
- EU (Germany, KIT), EU-DEMO (500 MWe, 2040-2050),
- Japan (NIFS),
- China

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ И ТЕРПЕНИЕ

**!!?? 21-я Международная Конференция по Материалам
Термоядерных Реакторов (ICFRM-21),
Испания, Октябрь 2023 г.,
<http://www.icfrm-21.com>**

Участие России – ДОКЛАДЫ : Пленарные, Устные ??

Предложения направлять (декабрь 2022 г.) -

**Б.В. Кутеев (РНЦ КИ), В.М. Чернов (ВНИИНМ) –
Члены Международного Комитета Советников ICFRM-21**