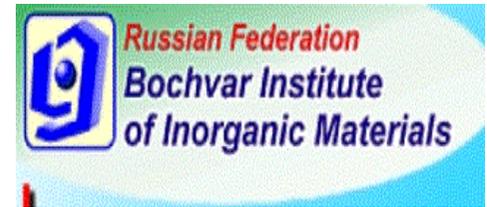


МГУ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ:
28 февраля, 2012



МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРОВ ДЕЛЕНИЯ И СИНТЕЗА

В.М. Чернов

ГК «Росатом», ОАО «Высокотехнологический НИИ
Неорганических Материалов имени академика
А.А.Бочвара», Москва, Россия

Чернов В.М. - МГУ, Физ. Фак, Выпуск 1963 г. Кафедра «Теория
атомного ядра». Руководитель дипломной работы – Балашов В.В.
Первая статья: В.В.Балашов, В.М.Чернов. Влияние фоновых
возбуждений ядра на характеристики гигантского резонанса
фотопоглощения. ЖЭТФ, 1962.

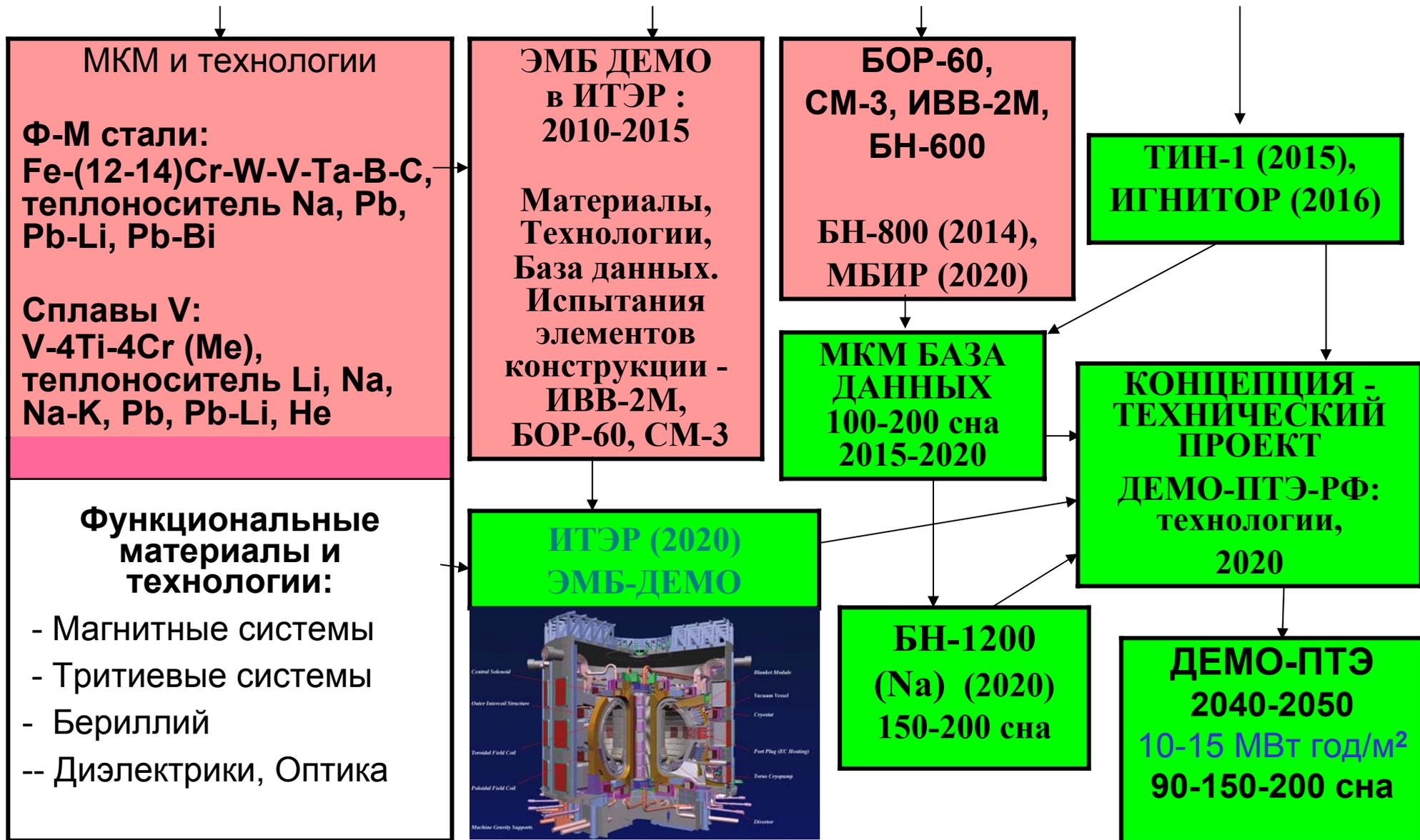
1973 г. – кфмн, 1987 г. – дфмн, 2007 г. – профессор.

Всего статей – 219, Патентов – 7, Монографий – 2.

E-LIBRARY.RU (11.05.2011): Число публикаций – 88, Индекс Хирша – 11,
Среднее число цитирований на одну публикацию – 5,73



Путь России к ядерной (БР) и термоядерной энергетике : Малоактивируемые Конструкционные Материалы (МКМ) и Технологии



Инновационные проекты ЯЭУ России - Конструкционные Материалы (КМ)

- БН (Na) – (11,2)17-20(К)-25 % т.а. КМ: (90)-150-200 сна,
- ТЯР – 1-2 ГВт электрической мощности. КМ: 90 (ДЕМО)- 150-200 сна.

Повреждаемость БН-600 – 60 сна-Fe/год. ДЕМО-РФ – 15 сна-Fe/год,

1. Использование имеющегося материаловедческого знания позволит «эволюционно» несколько продвинуться в создании новых КМ (сталей и сплавов) для ядерной техники ближайшего будущего, но обеспечить ими планируемые ресурсы энергетических ядерных и термоядерных реакторов в полной мере не удастся.
2. **НУЖНЫ НОВЫЕ КМ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В БОЛЕЕ ШИРОКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНТЕРВАЛАХ И ДЛЯ БОЛЕЕ ВЫСОКИХ РАДИАЦИОННЫХ, МЕХАНИЧЕСКИХ И КОРРОЗИОННЫХ НАГРУЗОК.**
3. Учитывая масштабы уже предпринятых усилий и полученных при этом результатов, маловероятно достижение существенного прогресса в этом направлении в обозримом будущем без большого объёма фундаментальных ориентированных радиационных материаловедческих исследований.
4. **ОСНОВНАЯ ЗАДАЧА – Создать КМ с наилучшими исходными (нерадиационными) функциональными свойствами и минимальной их радиационной деградацией при эксплуатации.**

ЯДЕРНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЦИКЛЫ

1. «Открытый ядерный топливный цикл - ОЯТЦ» – захоронение ОЯТ и Радиоактивных отходов (тысячелетия хранения).
2. «Замкнутый ядерный топливный цикл - ЗЯТЦ» (Россия, 2035 г.) - регенерация ОЯТ с возвратом U и Pu в энергетику, отделение ВАО (> 10,0 мЗв/час) и их захоронение в компактной и безопасной форме.
3. «Полный замкнутый топливный цикл - ПЗЯТЦ» - ЗЯТЦ + утилизация и повторное использование (рециклирование) большей части облучённых конструкционных материалов. Радиационно-эквивалентное захоронение отходов.

МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ (С БЫСТРЫМ СПАДОМ АКТИВНОСТИ) КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ (МКМ)

- Элементы Fe, Cr, W, V, Ta, Ti, Si, Zr, Be, C.
- Опытно-промышленных технологии производства:

Fe-Cr-W-V-Ta-C-Si, V-Ti-Cr, SiCf/SiC

КРИТИЧЕСКИЕ УРОВНИ МОЩНОСТИ ДОЗЫ: гамма-излучение с поверхности радиоактивного материала на расстоянии 1 см от неё –

менее 10,0 мЗв/час – разрешена переработка и повторное использование.

менее 0.025 мЗв/час - естественные (необлучённые) материалы.

МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ - Время достижения уровня 10,0 мЗв/час (охлаждение после облучения) не более 100 лет.

УЛУЧШЕНИЕ НЕЙТРОНИКИ ТВС РЕАКТОРОВ – Уменьшение доли паразитных потерь нейтронов при использовании МКМ.

Функциональные свойства МКМ лучше (или не уступают) обычных КМ.

ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ (КМ) АКТИВНЫХ ЗОН ЯЭУ

1. Расширение температурного интервала эксплуатации (температуры теплоносителей):
 T_{min} – хладноломкость КМ, T_{max} – жаропрочность-жаростойкость КМ.
2. Повышение нейтронных нагрузок (100 - 200 сна).
3. Малая накапливаемая радиационная деградация микроструктуры (малая Кумулятивная Повреждаемость - КП) и функциональных свойств КМ (изделий).
4. Малое радиационное распухание КМ ($\Delta V/V < 5\%$).
5. T_{max} - Жаропрочность (>700 °С для ОЦК сталей и сплавов).
6. T_{min} (ОЦК) – Низкая температура охрупчивания (хладноломкости) и ослабление тенденции к радиационному повышению температуры охрупчивания ОЦК сталей и сплавов ($T_{min}: < 300$ °С).
7. Понятное и Прогнозируемое поведение материала (изделия) в ресурсных условиях, которые имеющимися данными не перекрываются.
8. Неопределенности Кумулятивной Повреждаемости (КП):
 - начальный уровень (технология изготовления),
 - интенсивность и последовательность,
 - критический уровень,
 - стратегия и критические критерии определения.

ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ И НАПРАВЛЕНИЕ РАЗРАБОТОК МКМ
(специфика – предельно низкая концентрация сильно
активируемых примесей) –

ЖАРОПРОЧНЫЕ, ЖАРОСТОЙКИЕ И ХЛАДОСТОЙКИЕ
РАДИАЦИОННОСТОЙКИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

НАПРАВЛЕНИЕ - НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ

ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СОСТАВОВ И МЕТОДОВ ХИМИКО-
ТЕРМИЧЕСКИХ (ХТО) И ТЕРМО-МЕХАНИЧЕСКИХ (ТМО) ОБРАБОТОК
ВЫСОКОЧИСТЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ В НИХ
ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ (НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ) СТРУКТУР,
СТАБИЛЬНЫХ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И НЕЙТРОННЫХ
ВОЗДЕЙСТВИЯХ.

УПРАВЛЯЕМОЕ СОЗДАНИЕ ЗЁРЕННОЙ СТРУКТУРЫ И ВНУТРИЗЁРЕННЫХ
ДИСЛОКАЦИОННЫХ СУБСТРУКТУР.

РАВНОМЕРНОЕ насыщение объёмов и границ зёрен наноразмерными окси-
карбо-нитридо-частицами (когерентными с матрицей преципитатами)
размерами 5-10-50-(100) нм.

ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫЕ (12-14)% Cr МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ СТАЛИ Fe-Cr-W-V-Ta-Ti-Si (ОАО «ВНИИНМ»)

Применение:

БН-800 (Na), БН-1200 (Na), БРЕСТ (Pb).

Экспериментальный модуль ДЕМО в ИТЭР, ДЕМО-ПТЭ (Pb-Li)

ОАО «ВНИИНМ» + Промышленность:

ЭК-181 (RUSFER-EK-181) – Fe-12Cr-2W-V-Ta-B-C-N.

Рекомендации для применения: (300)350-670(700) °C.

+ НЕРАСПУХАЮЩАЯ (<100 сна, > 100 сна ?).

- Нет высокотемпературных реакторных испытаний (>100 сна).

ФЕРРОМАГНИТИЗМ (? устойчивость конфигурации магнитного поля в ТЯР-ТОКАМАК ?).

2009-2015: Fe-(12-14)Cr-W-V-Ta-B-C-N:

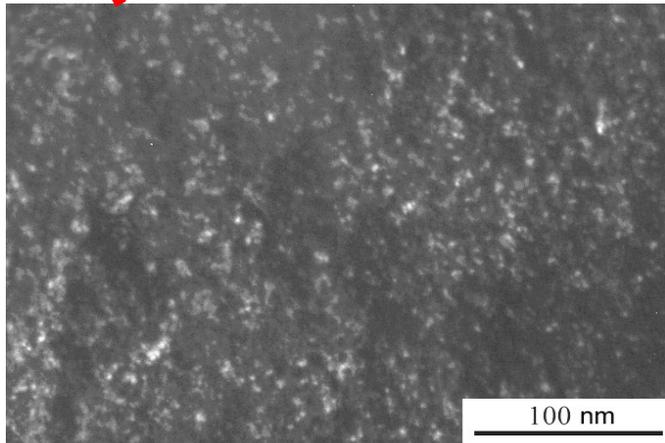
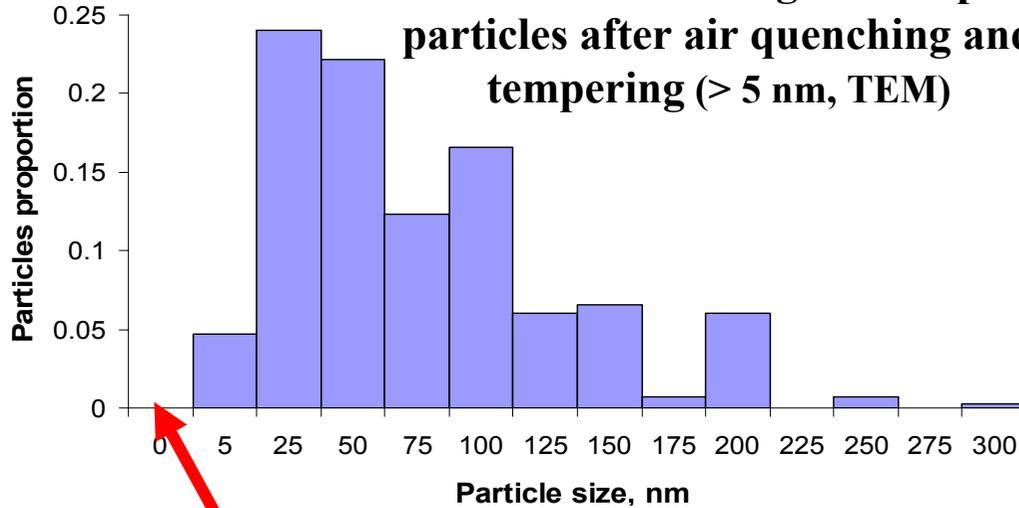
Высокотехнологичные, высокочистые (по примесям), высокоомогенные, жаропрочные, жаростойкие, наноструктурированные малоактивируемые ферритно-мартенситные стали:

100-150-200 сна, $T_{\min} < 300 \text{ C}$, $T_{\max} = 700 \text{ C}$.

RAFMS RUSFER-EK-181: Fe-12Cr-2W-V-Ta-B-C

Precipitation hardening - Basic phase particles

Size distribution histograms of phases particles after air quenching and tempering (> 5 nm, TEM)



VC/TaC nanoparticles of 3–5 nm size (TEM) providing precipitation hardening of the steel after quenching and tempering

Carbide phases precipitate during tempering with different compositions and sizes (TEM):

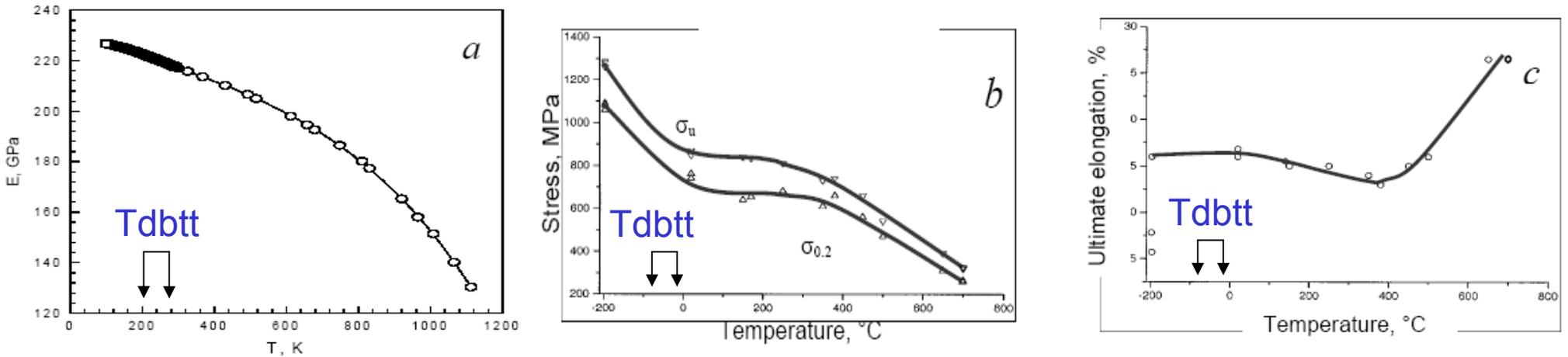


Mean particle size is 75.1 ± 7.4 nm

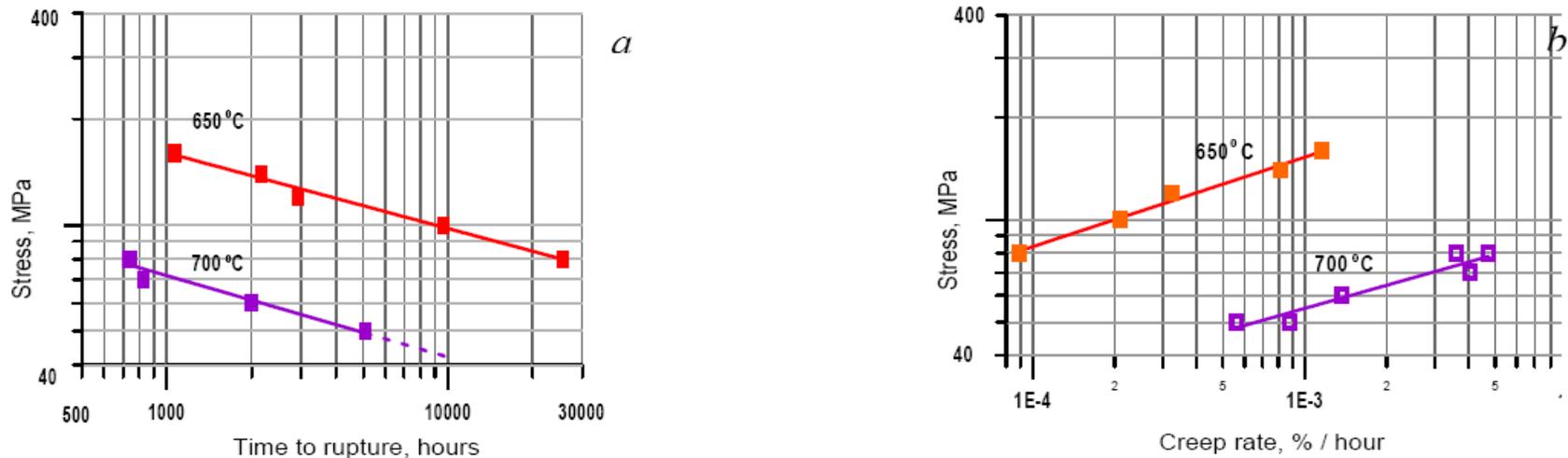
- Carbides provide precipitation hardening of the steel and fixation of low- and large-angle boundaries (grain boundary engineering).

- VC/TaC nanoparticles of 3–5 nm size constitute an appreciable part of the carbide phase.

RUSFER-EK-181 (Traditional Thermal Treatment): Initial Properties



Mechanical properties of the specimens vs. temperature curves: (a) elastic module (E , GPa), (b) yield point ($\sigma_{0.2}$, MPa) and ultimate stress (σ_u , MPa), (c) ultimate elongation (%).



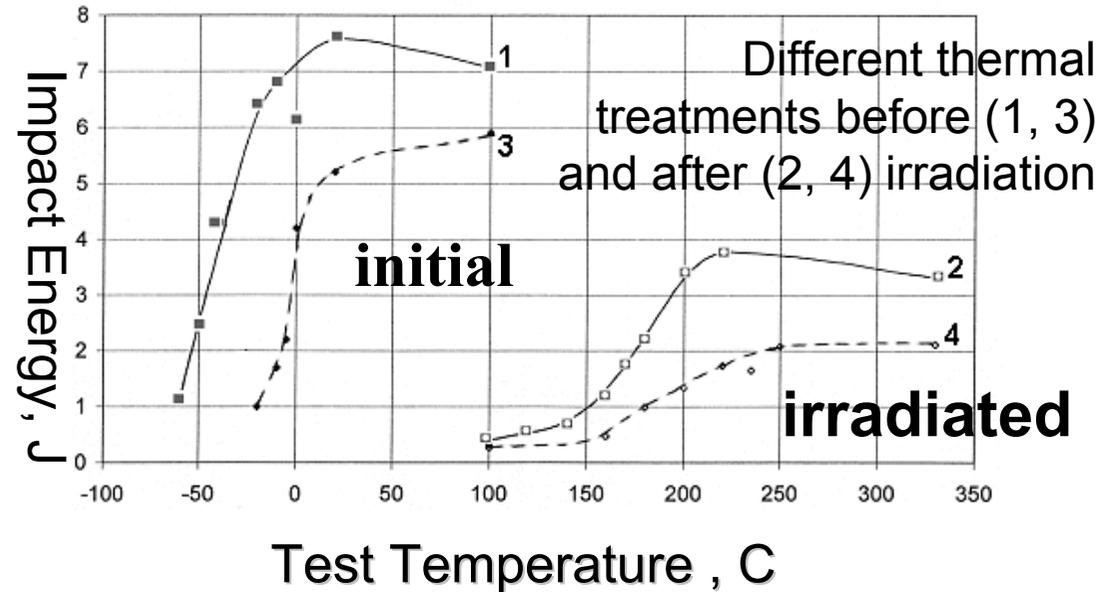
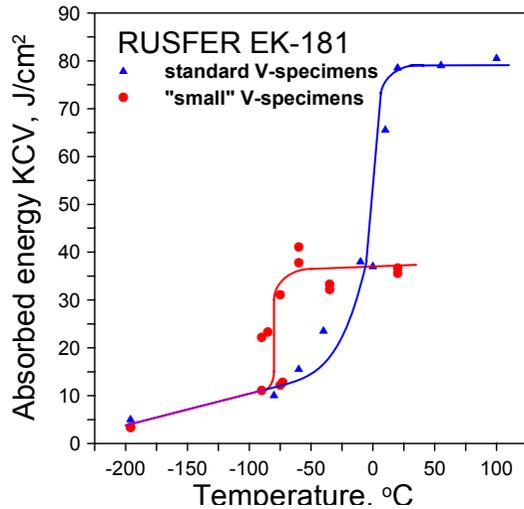
(a) Stress and Time of the creep-rupture time (hours) and (b) creep rate (%/hour) as a function of stress (MPa) at 650 $^{\circ}\text{C}$ and 700 $^{\circ}\text{C}$.

THE SMs CRITICAL PROPERTIES: LOW TEMPERATURE EMBITTELEMENT of the BCC metals (ferritic-martensitic steels, vanadium alloys, etc.).

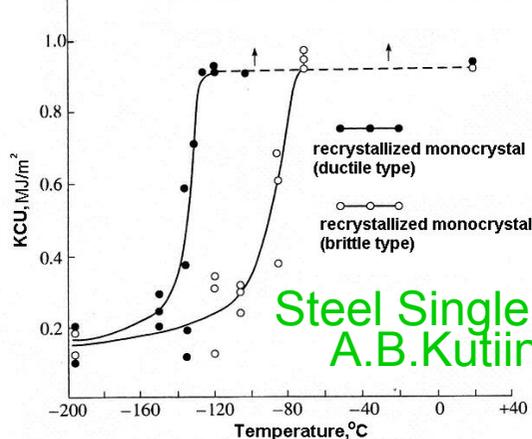
RAFMS Fe-12Cr-2W-V-Ta

The shift of the DBTT under the low temperature (< 400 °C) irradiation

Fast reactor BOR-60, $T_{irr}=340\text{ }^{\circ}\text{C}$, dose = 15 dpa.



Charpy impact curves for recrystallized monocrystals



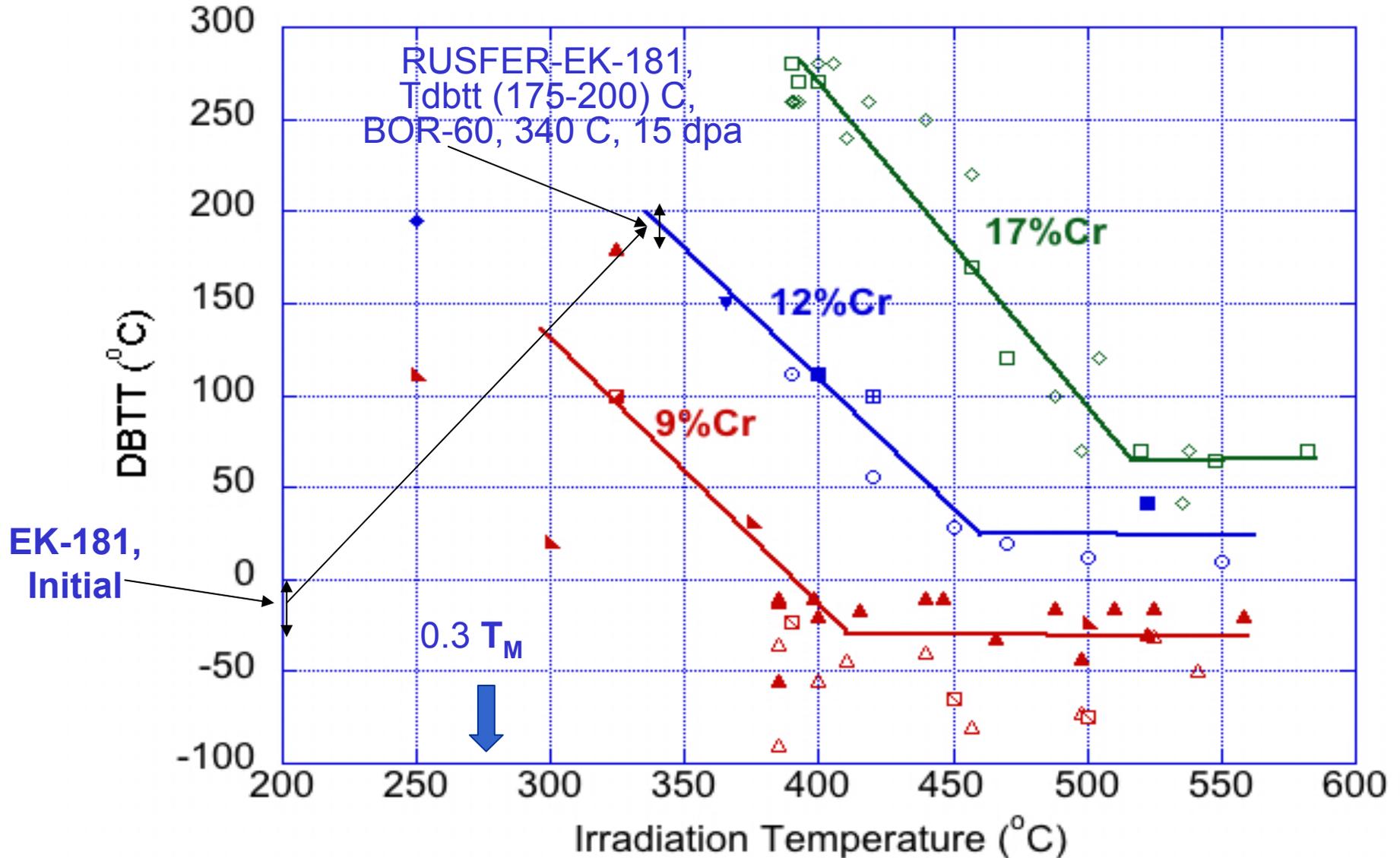
Steel Single Crystals,
A.B.Kutiin, 2008

Q: How to fabricate the SMs without the LTIE ?

A: Use only the FCC metals (but swelling ?)

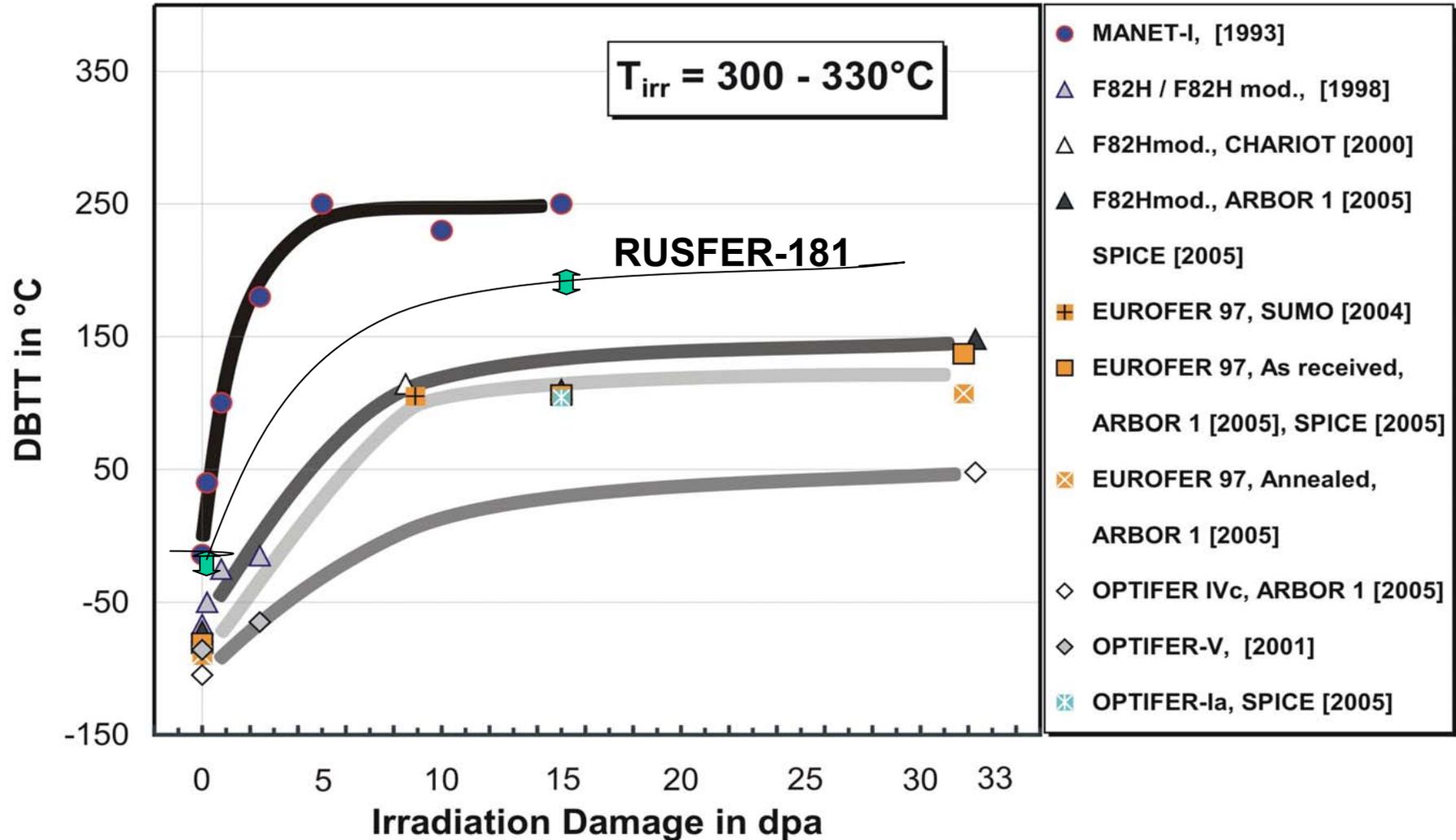
Effect of Neutron Irradiation on the T_{DBTT} in Ferritic/Martensitic Steels

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



Effect of Neutron Irradiation on the T_{DBTT} in Ferritic/Martensitic Steels

after C.Petersen, et.al. 21th IAEA Fusion Energy Conference, Chengdu, 2006



Малоактивируемые сплавы V-Ti-Cr(Me, C, O, N) (ОАО «ВНИИНМ»)

2011: V-4Ti-4Cr: Слитки 50-110 кг, применение (300)350-750(800) °C.

- + Малораспухающие (< 100 сна, >100 сна ? – нет эксперимента), жаропрочные, не ферро-магнитные.**
- Нет высокодозных реакторных испытаний (> 100 сна).**
- Малая плотность (6.0 – 6.2 г/см³).**

Применение: ЭБМ ДЕМО в ИТЭР, ДЕМО-ПТЭ (Li, He).

БН: БН-1200/БН-К (Na), (ВТГР (He).

Космические ядерные реакторы (Li).

2011-2015: V-(8-4)Ti-(5-4)Cr(Me, C, O, N): Me=W, Zr, др.

Высокотехнологичные, высокочистые (по примесям), высокоомогенные, жаропрочные, жаростойкие, наноструктурированные малоактивируемые промышленные сплавы (слитки 100-300-500 кг):

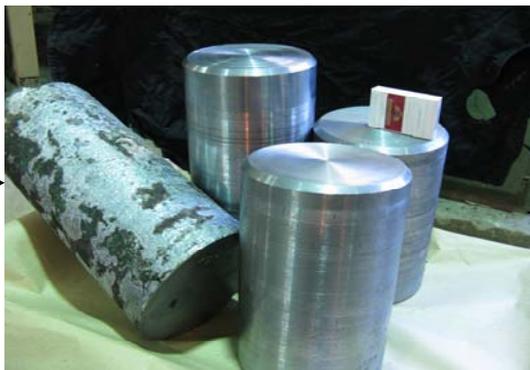
100-150-200 сна, T_{min} <300 °C, T_{max} = 850(900) °C.

Сплав V-4Ti-4Cr: ОАО «ВНИИНМ», 2000 – 2011 гг.

2000.
Слитки:
45-50 кг



2008.
Слитки: 50-55 кг



2009-2011
Слитки: 100-110 кг

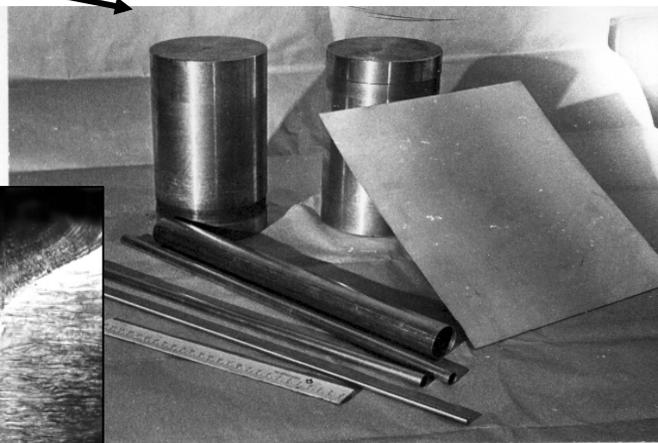


2013-2015
Слитки: 300 кг

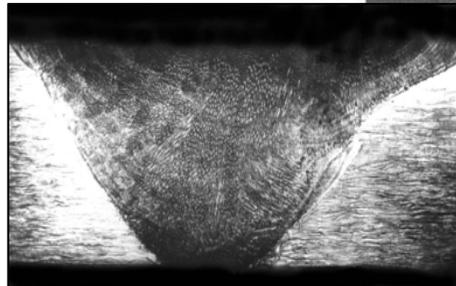


Слиток 50 кг:
-трубы $75 \times 5 \div 20 \times 1$ мм,
-профили $120 \times 20 \times 5$ мм;
-листы $1930 \times 367 \times 5$ мм;

-сварка (листы 2-6 мм)



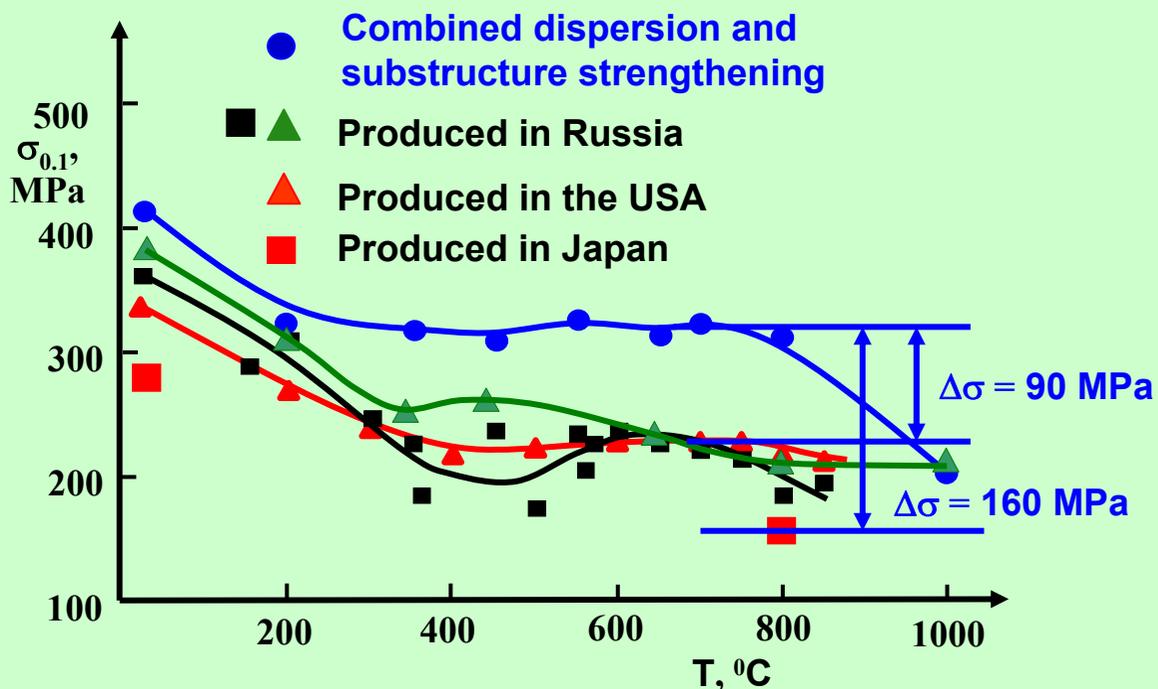
- листы $1930 \times 367 \times 15$ мм;
- листы $1500 \times 257 \times 80$ мм,
- трубы 67×6 мм



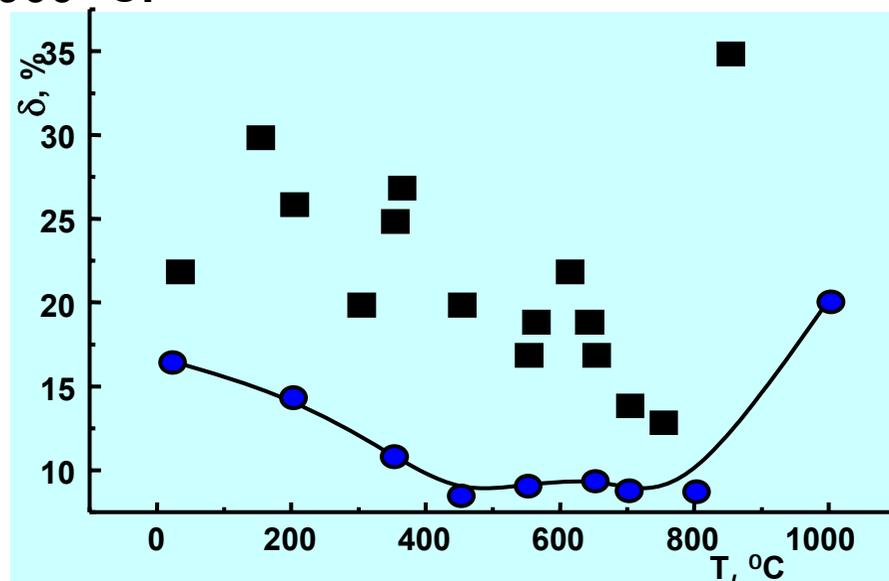
V-4Ti-4Cr: Дисперсионно-твердеющий (наноструктурированный) сплав

Имеющиеся технологии обеспечивают мировую конкурентоспособность свойств сплава V-4Ti-4Cr (слитки весом 110 кг).

Дальнейшие разработки новых технологий (слитки 150-300-500 кг, создание объёмных наноструктурированных и субструктурных состояний) обеспечат существенное улучшение качества изделий и их высокотемпературных свойств. Жаропрочность может быть увеличена до 850-900 °С.

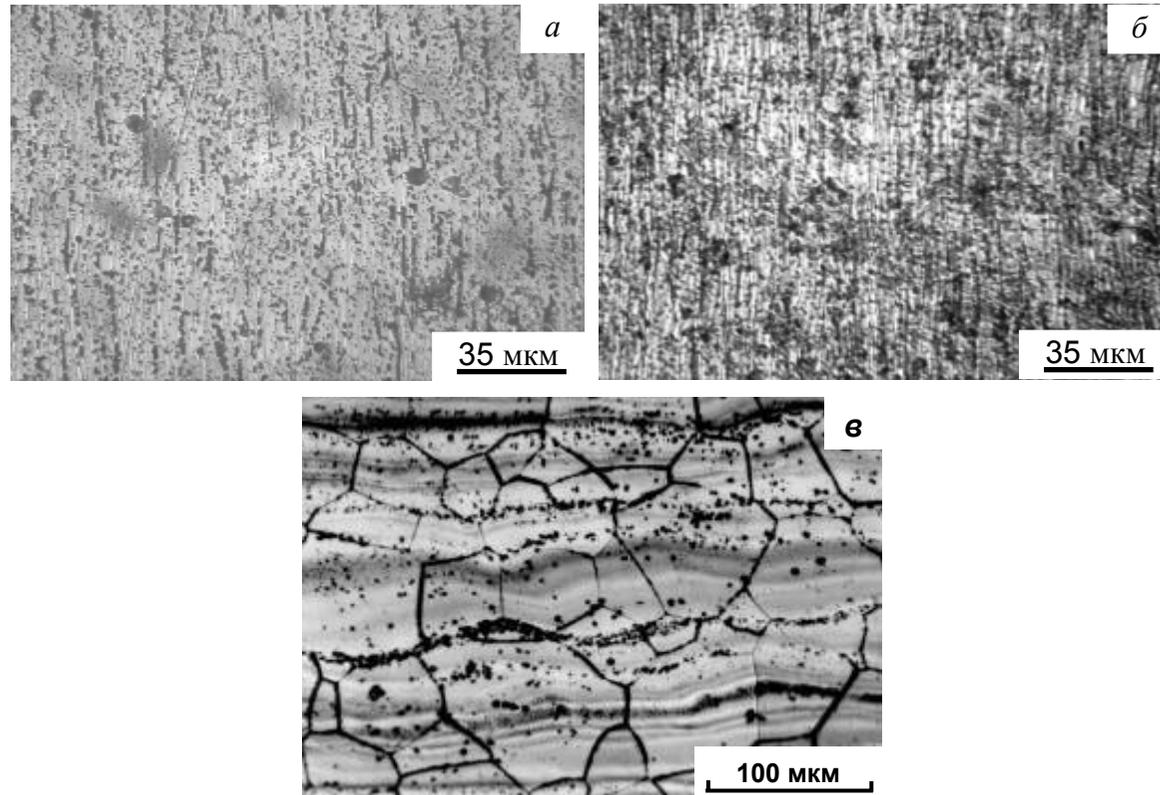


Температурные изменения пределов текучести сплавов России, США и Японии, обработанных по традиционной технологии (нижние три кривые) и по новой технологии (сплав России, верхняя кривая).



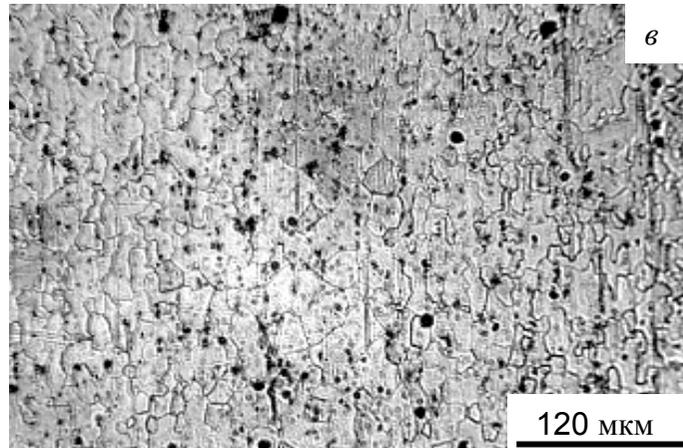
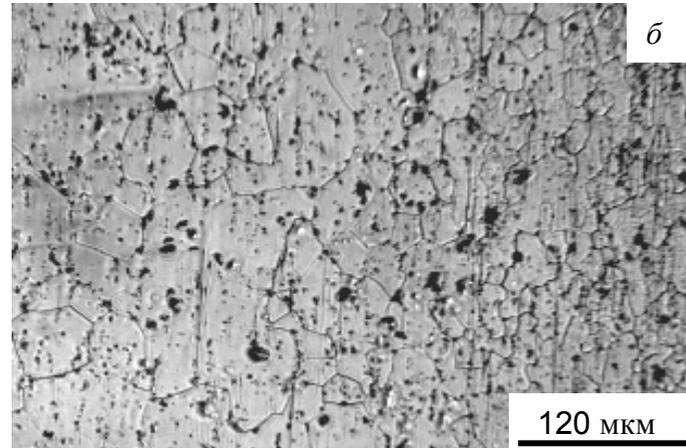
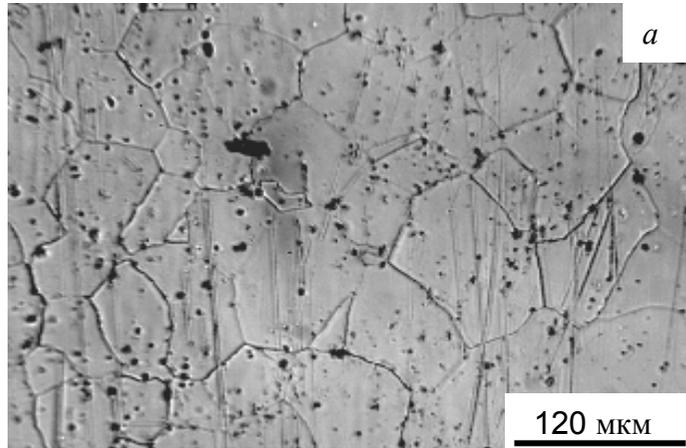
Температурные зависимости относительного удлинения сплава V-4Ti-4Cr после их термомеханических обработок по традиционной (квадратики) и по новой (сплошная линия) технологиям.

Микроструктура сплавов V-Cr-Zr (а), V-Cr-W-Zr (б) и V-4Ti-4Cr (в) после часовых отжигов при температурах ниже температуры собирательной рекристаллизации.



a –V-Cr-Zr, T = 1000 °C; *б* –V-Cr-W-Zr, T = 1000 °C;
в –V-4Ti-4Cr, T = 1000 °C.

Микроструктура сплава V-Cr-W-Zr после отжигов 1400 °С 1 час в исходном (до внутреннего окисления) и внутреннеокисленных по разным режимам состояниях.



a – T = 1400 °С 1 час в исходном состоянии;

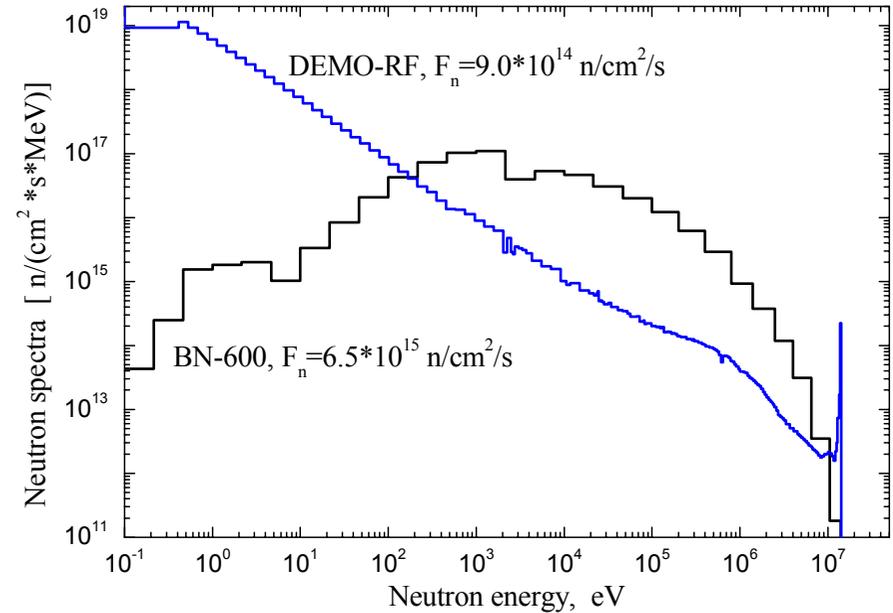
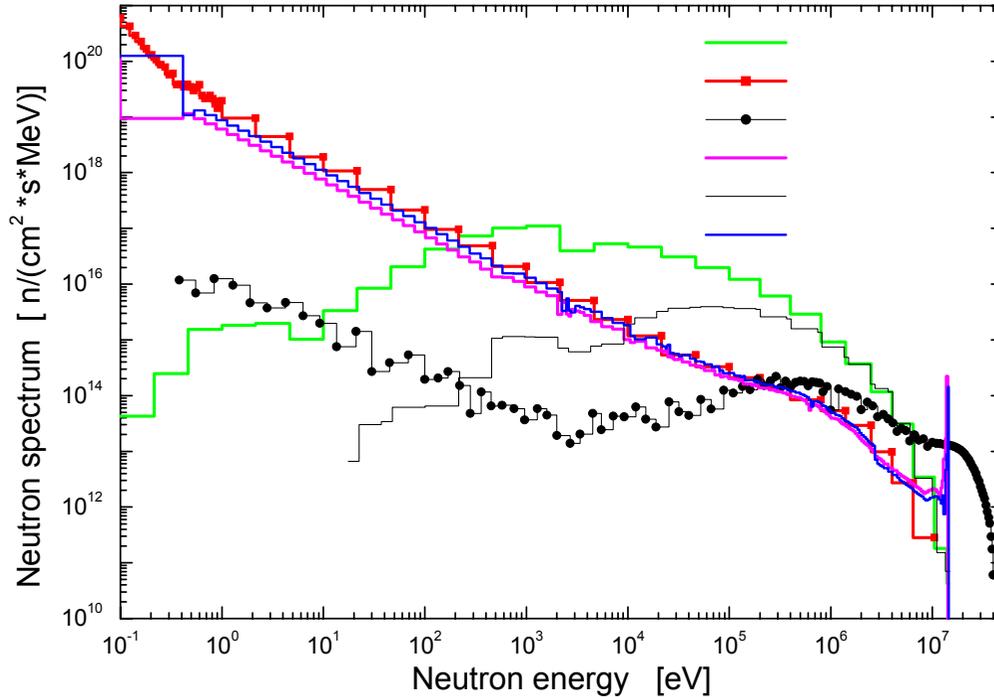
б – T = 1400 °С 1 час после внутреннего окисления, $C_O \approx 1,2$ ат %;

в – T = 1400 °С 1 час после внутреннего окисления, $C_O \approx 2,1$ ат %;

Влияние легирования, режимов ТМО и **внутреннего окисления** на механические свойства ванадиевых сплавов при разных температурах

Режим обработки, концентрация кислорода в сплаве, ат. %.	T = 20 °C			T = 800 °C		
	$\sigma_{0,1}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	$\sigma_{0,1}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Сплав V-Cr-Zr						
ТМО I – стандартный. Отжиг 1000 °C 1 ч.	240	395	25	180	235	26
ТМО II, с изменением механизма $V_2C \rightarrow TiV(C,O,N)$ превращения	340	475	13	285	325	7
Внутреннее окисление, $C_O = 1.3$ ат. %	580	670	12	335	370	8
Сплав V-Cr-W-Zr						
ТМО I – стандартный. Отжиг 1000 °C 1 ч.	300	480	25	190	265	25
ТМО II, с изменением механизма $V_2C \rightarrow TiV(C,O,N)$ превращения	406	550	13	320	350	5
Внутреннее окисление, $C_O = 1.9$ ат. %	710	790	12	310	375	4
Сплав V-4Ti-4Cr						
ТМО I – стандартный. Отжиг 1000 °C 1 ч.	300		20	180		18
ТМО II, с изменением механизма $V_2C \rightarrow TiV(C,O,N)$ превращения	340		25	230		18
ТМО III - ТМО II в комбинации с образованием мелкокристаллической структуры	380		24	280	18	14

Neutron Sources



BN-600 – Fast Sodium Power Reactor,
IVV-2M – Experimental water reactor,
IFMIF – accelerator neutron source (IEA project),
DEMO-RF – Fusion reactor (RF project),
BOR-60 – experimental sodium fast reactor,
GDT-NS – plasma neutron source (RF project).
ITER – under construction (Kadarash, France).
MBIR - MFTR (2018)

FLUX F_n (n/cm²/s, $E > 0$):

BN-600: $6.50 * 10^{15}$,
 IVV-2M : $5.29 * 10^{14}$,
 IFMIF: $6.71 * 10^{14}$,
 DEMO-RF: $9.00 * 10^{14}$,
 BOR-60: $3.00 * 10^{15}$,
 GDT: $5.18 * 10^{14}$
 ITER: $3.88 * 10^{14}$
 MBIR: $6.00 * 10^{15}$

THE QUESTIONS ON THE WAY TO THE ADVANCED SMs FOR NUCLEAR FISSION AND FUSION POWER REACTORS

DIFFERENT:

- NEUTRON SPECTRA.
- NEUTRON FLUXES AND FLUENCES.
- DAMAGE RATES.
- STRUCTURAL MATERIALS AND NUCLEAR TECHNOLOGIES.
- MODELS AND APPROACHES.

HOW TO COMPARE THE RESULTS ?

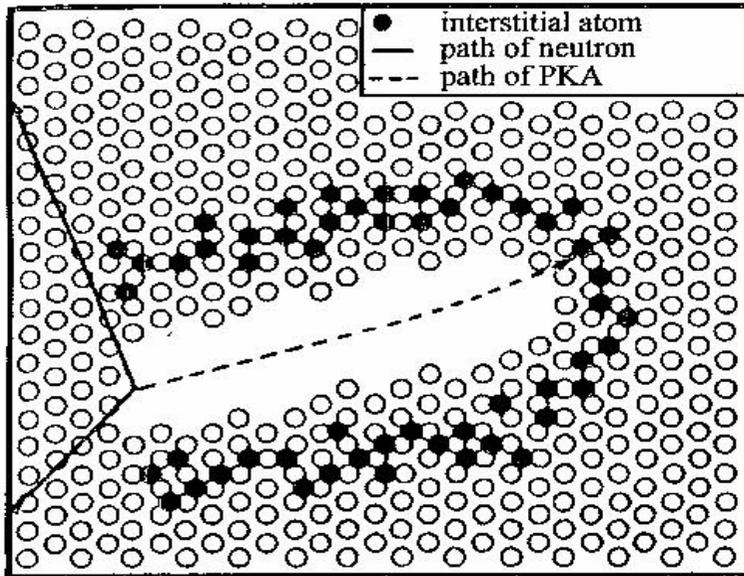
HOW TO USE THE UP-TO-DATE EXPERIMENTAL RESULTS ?

HOW TO DO THE SCIENCE-BASED RECOMMENDATIONS ?

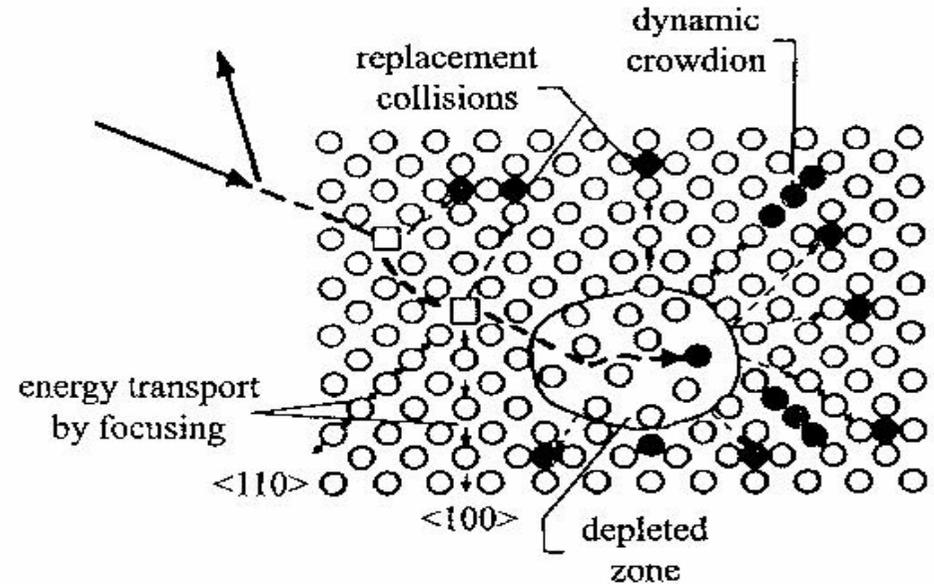
WHAT NEUTRON SOURCES ARE NECESSARY TO PROVIDE ADEQUATE SMs DATABASE FOR THE DESIGN OF INNOVATIVE FISSION AND FUSION POWER REACTORS IN TIME ?

PRIMARY RADIATION DAMAGE(PRD): COLLISION CASCADE

(history start, 1956)



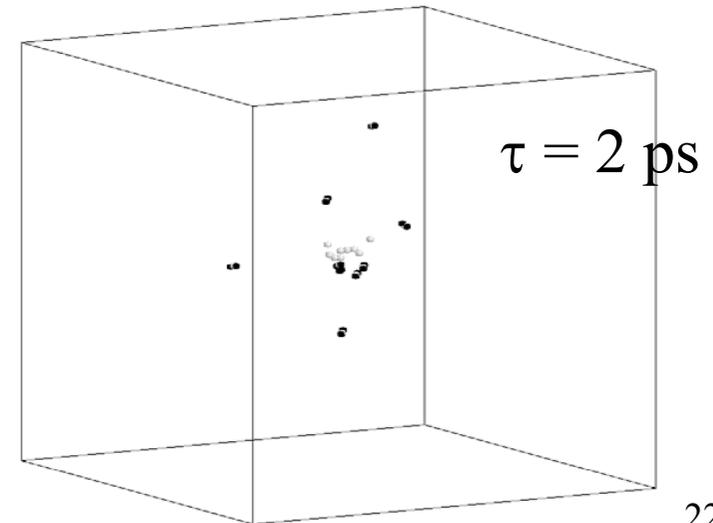
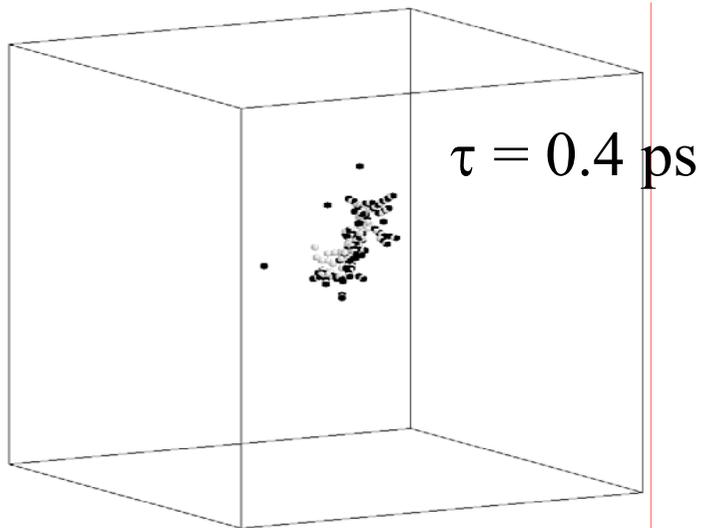
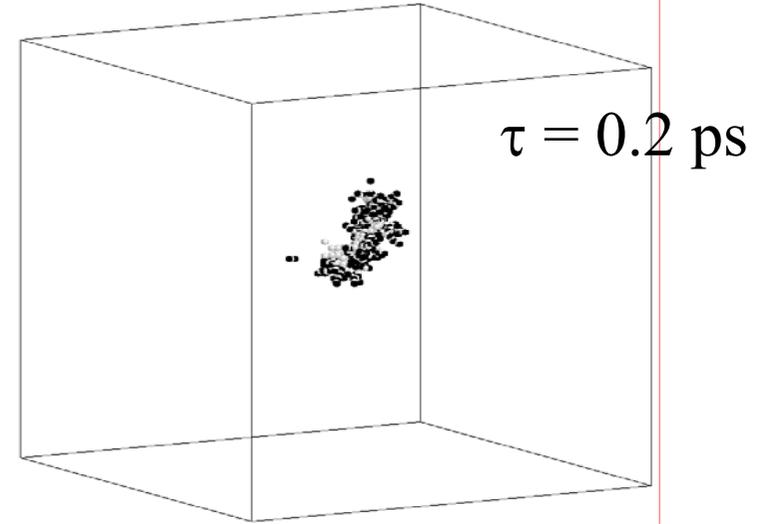
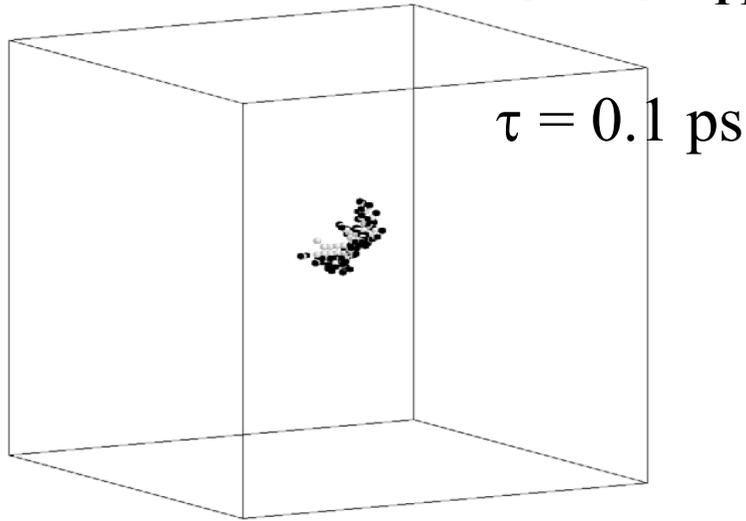
Original version of the collision cascade from the Primary Knock-on Atom (PKA) as the **displacement spike** with a high core density of vacancies surrounded by an interstitial shell (Brinkman J.A., 1956)



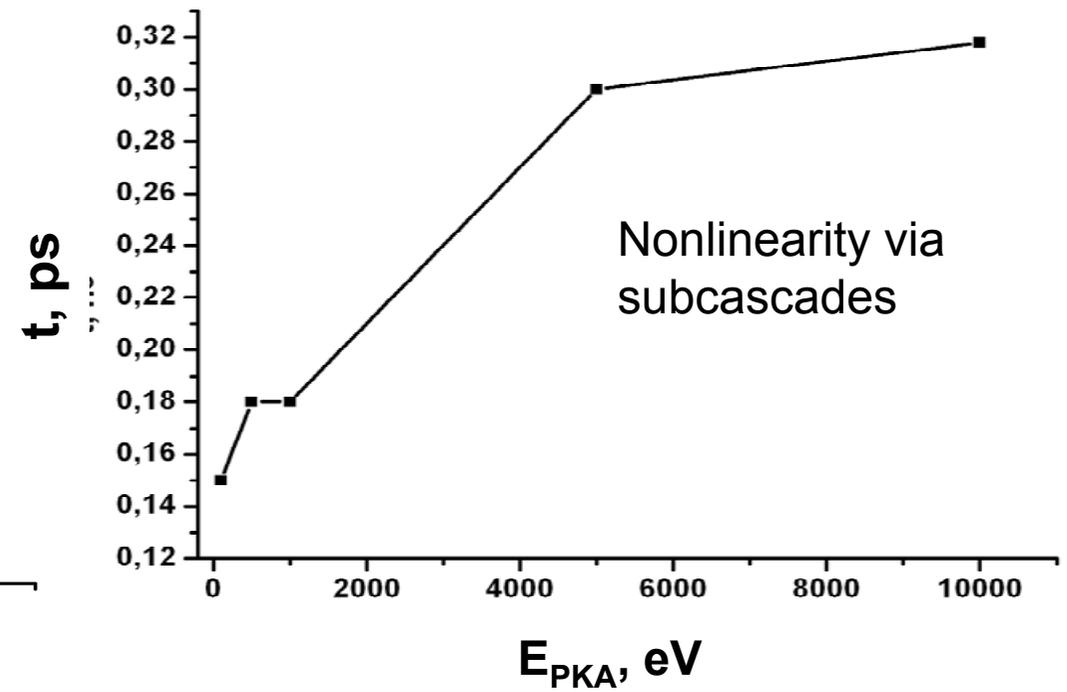
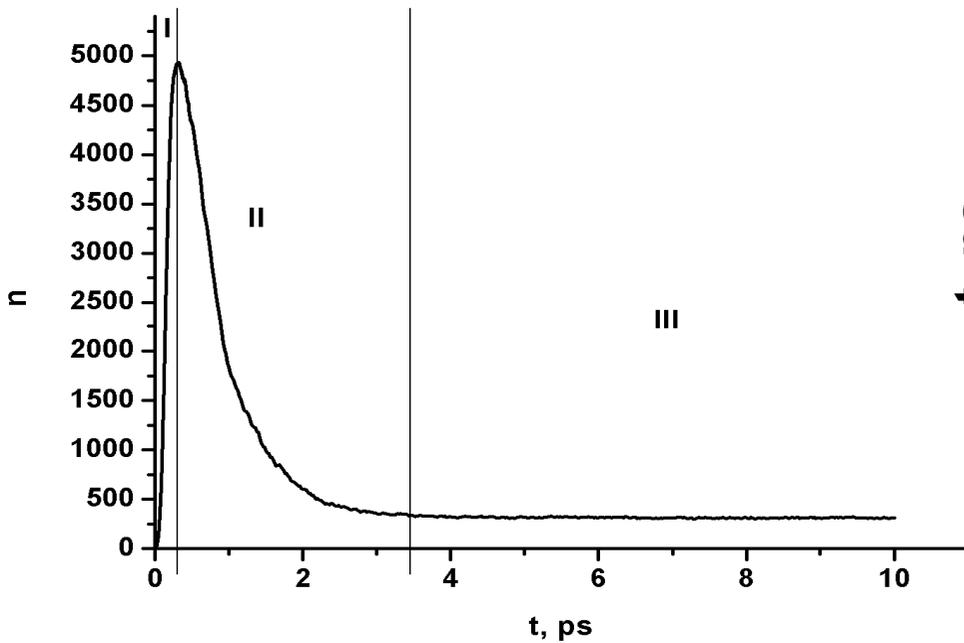
Revised version of the displacement spike from the PKA as a **depleted zone** for the crystallite with the focusons, replacement collisions and channeling (Seeger A., 1958)

VANADIUM (450 000 atoms): MD simulation of cascades in vanadium crystal with the ideal initial lattice structure.

[320] $E_{\text{PKA}} = 1 \text{ keV}$



THE STAGES OF THE COLLISION CASCADE IN VANADIUM CRYSTAL WITH THE IDEAL INITIAL LATTICE STRUCTURE

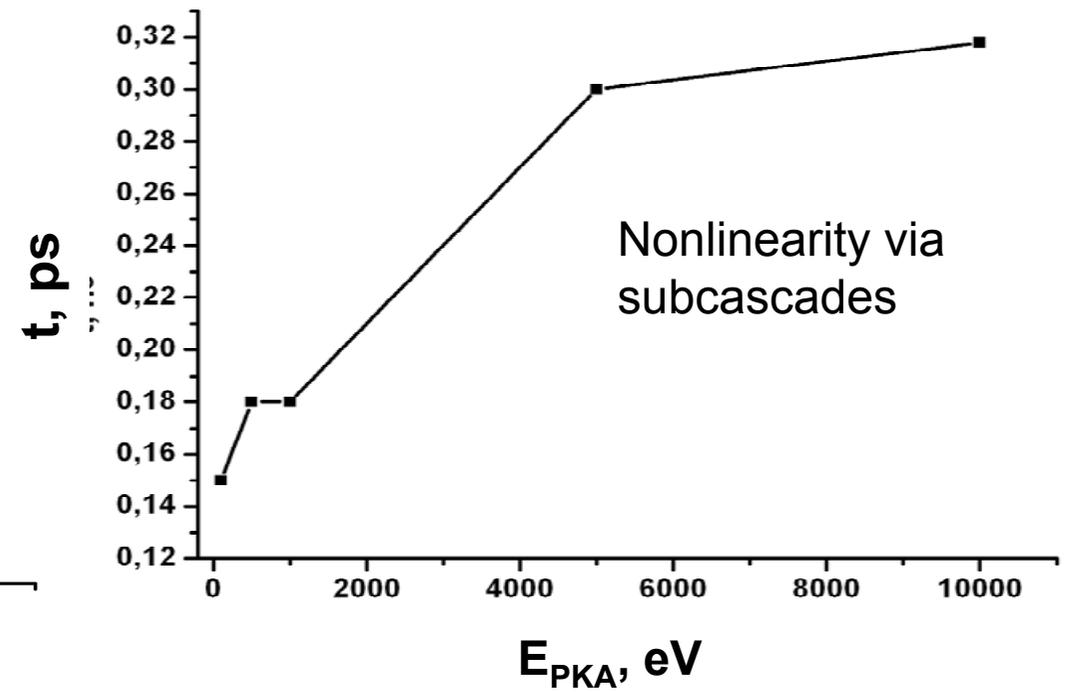
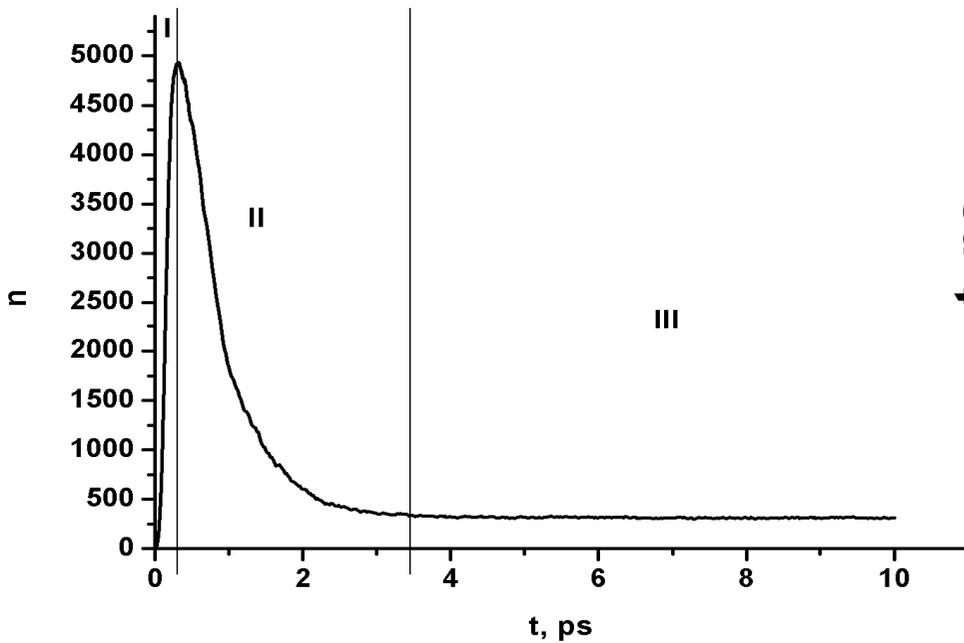


The time dependence of the Number of the point defects $n(t)$ (Frenkel pairs). [100] $E_{PKA} = 10$ keV.

- I – dynamic (ballistic) stage (max number of the defects),
- II – Relaxation (recombination) stage.
- III - Diffusion (basic) stage.

Dependence of the time "peak" t (ps) from the PKA Energy ([100] E_{PKA} , eV)

THE STAGES OF THE COLLISION CASCADE IN VANADIUM CRYSTAL WITH THE IDEAL INITIAL LATTICE STRUCTURE



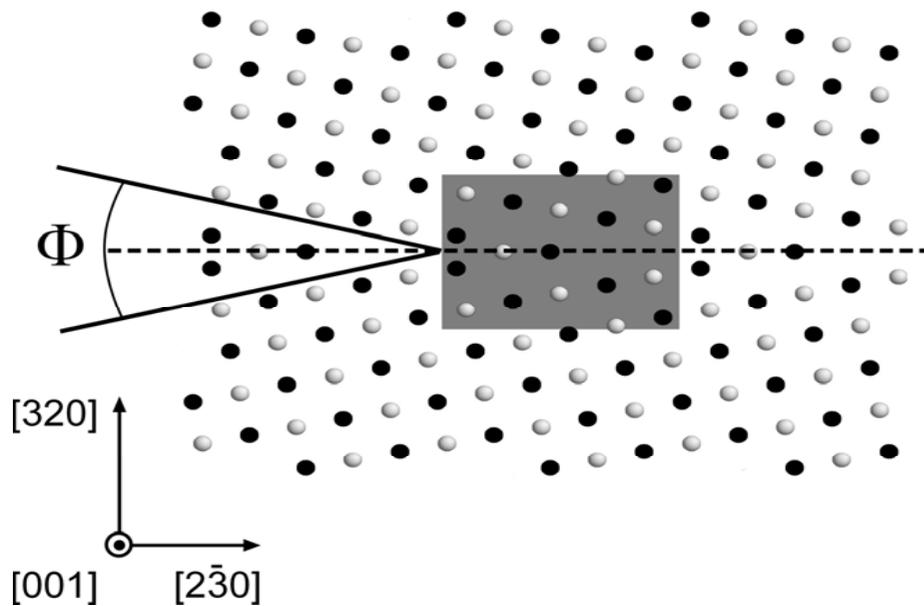
The time dependence of the Number of the point defects $n(t)$ (Frenkel pairs). [100] $E_{PKA} = 10$ keV.

- I – dynamic (ballistic) stage (max number of the defects),
- II – Relaxation (recombination) stage.
- III - Diffusion (basic) stage.

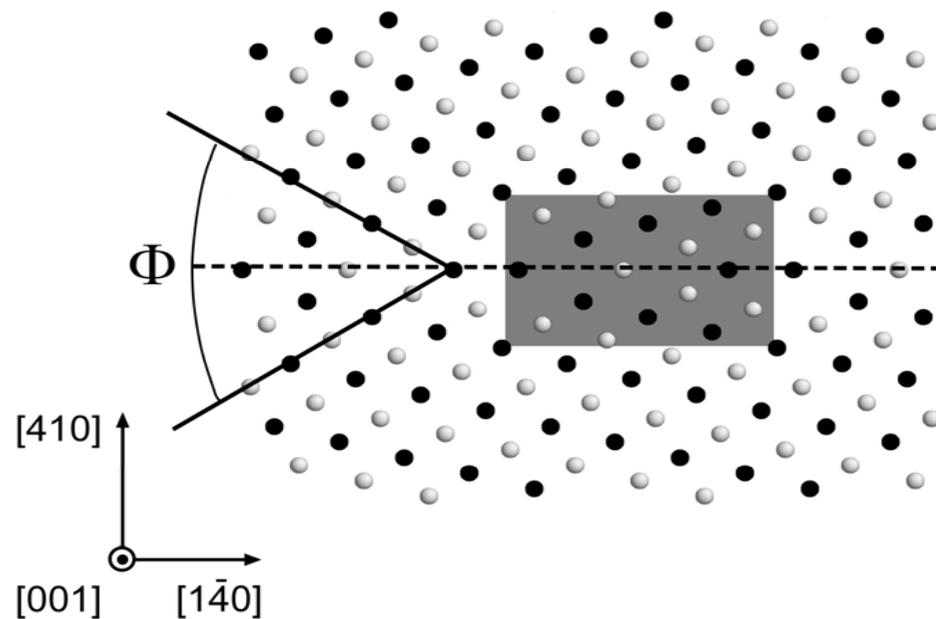
Dependence of the time "peak" t (ps) from the PKA Energy ([100] E_{PKA} , eV)

VANADIUM: MD Simulation of cascades in the vicinity of grain boundaries

$\Sigma 13$ and $\Sigma 17$ GRAIN BOUNDARY MODELS: Projections of atoms on (001) plane.



$\Sigma 13$ (320)[001] $\Phi = 22.62^\circ$

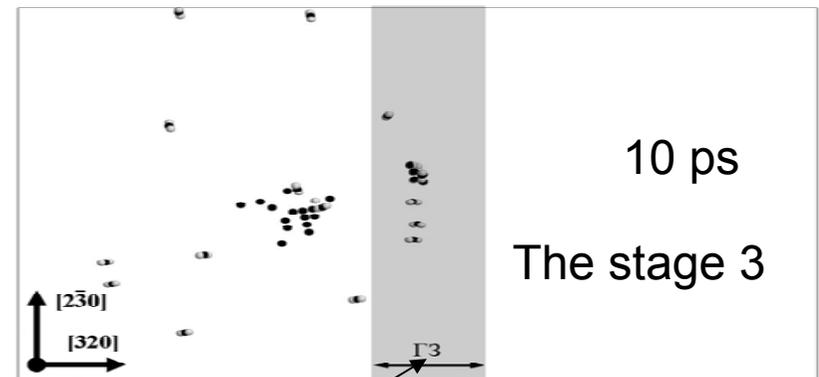
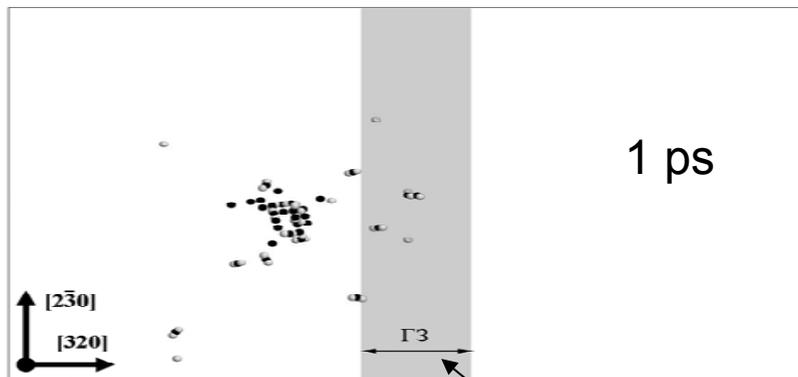
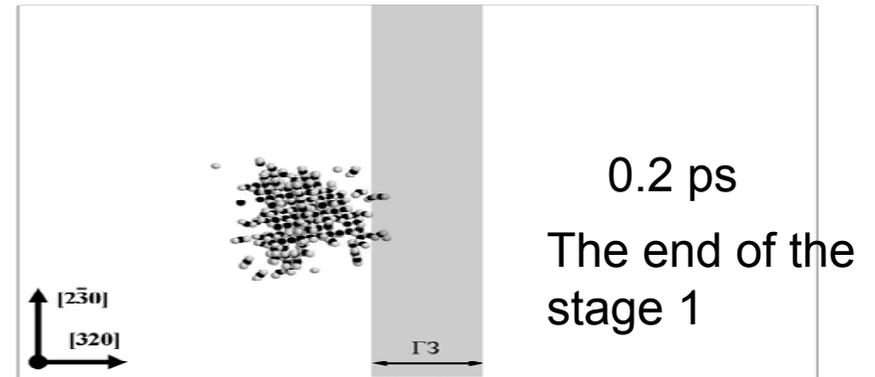
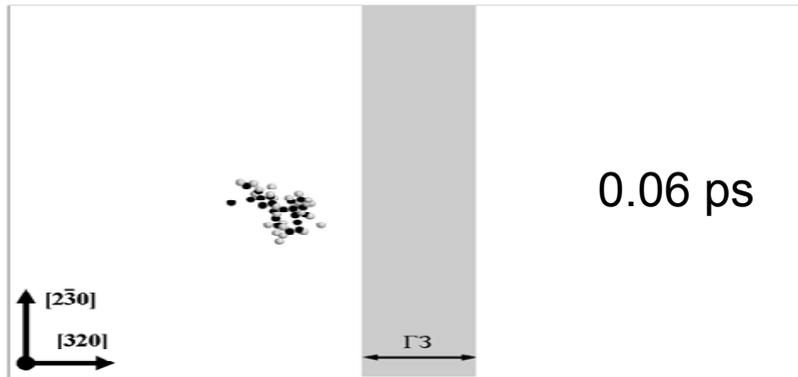


$\Sigma 17$ (410)[001] $\Phi = 28.07^\circ$

Black area – the distance period along the boundary.

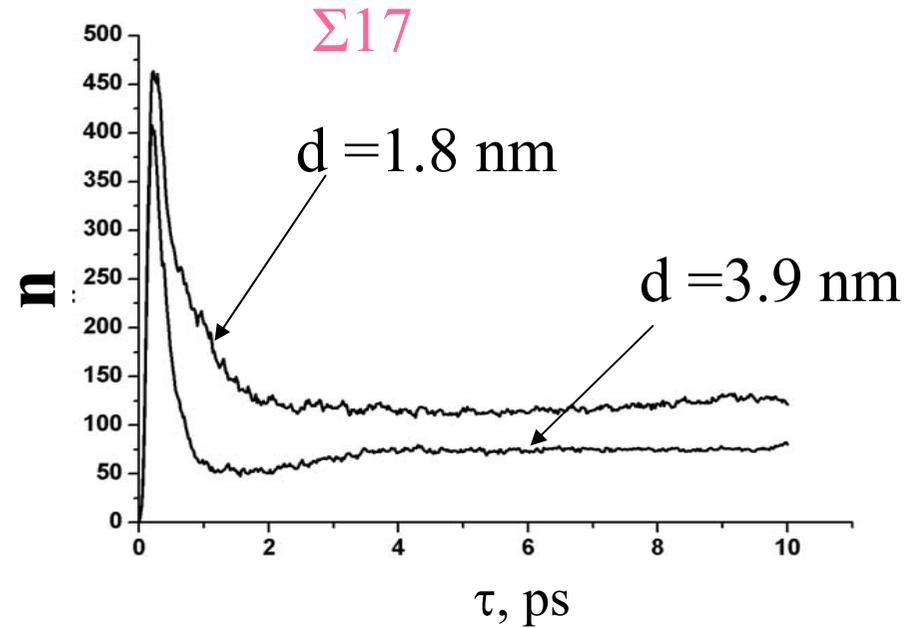
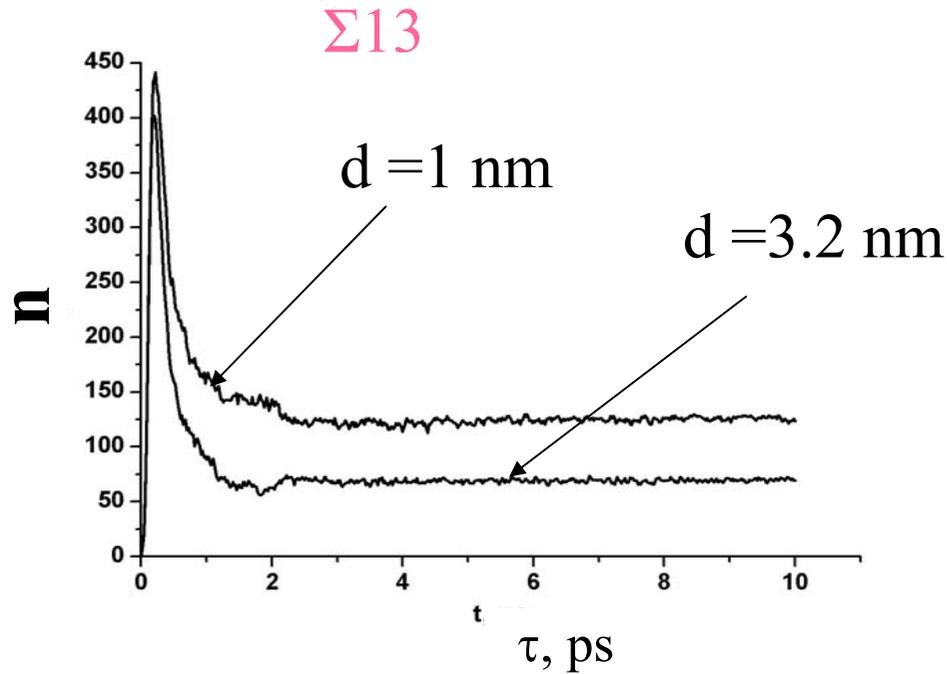
VANADIUM CRYSTAL: THE CASCADE SIZE (THE PROJECTIONS OF POINT DEFECTS ON (001) PLANE) FOR DIFFERENT TIMES.

GB Σ 13. $[320] E_{\text{PKA}} = 1$ keV. The distance BETWEEN PKA AND GB = 3,87 nm.



Grain Boundaries

VANADIUM: MD Simulation of cascades in the vicinity of grain boundaries



$E_{\text{PKA}} = 1 \text{ keV}$

\perp to the GB

Time dependence on the number of point defects $n(\tau)$.

d - the distance from the PKA initial position to the GB

TRANSMUTATION/ACTIVATION OF SMs

D(t) - Formation of a nuclear product **A** up to irradiation time **t**.

D₀(t)- Formation rate of a product **A**.

σ(E) – cross sections of all nuclear reactions for a product **A**.

φ(E) dE – the neutron flux in energy interval (E, E+dE),

n – the number of the material components (chemical composition) with the concentrations **x_i** (i = 1, 2, ..., n) forming a product **A**.

E_m – minimum energy for nuclear reactions with formation of a product **A**.

$$D(t) = \int_0^t D_0(\tau) d\tau$$

$$D_0 = \int_{E_m}^{\infty} \sigma(E) \varphi(E) dE$$

$$\sigma(E) = \sum_i x_i \sigma_i$$

**RADIATION RATE DAMAGE K_d , dpa/s,
(formation of stable Frenkel's pair):**

$$K_d = \int_{E_{\min}}^{\infty} \sigma_d(E) \varphi(E) dE, \quad \sigma_d(E) = \int_{T_d}^{T_{\max}} \nu(T) \frac{d\sigma(E, T)}{dT} dT$$

K_d – radiation rate damage – **dpa/s**;

$\varphi(E) dE$ – a density of neutron flux in the energy interval $(E, E+dE)$;

$\sigma_d(E)$ – dpa Cross Section;

T – the kinetic energy of the residual nucleus;

T_d - the effective threshold energy needed to shift a nucleus from lattice position;

$d\sigma(E, T)/dT$ – the spectrum of the recoil residual nucleus (the PKA spectrum) in LAB-system produced via all nuclear elastic, inelastic, $(n, 2n)$, (n, p) , (n, α) , (n, γ) and so on reactions;

$\nu(T)$ – cascade function, the number of displacement atoms produced by the PKA with energy T (fa, NRT model + IAEA recommendations).

THE RF (A.I.Blokhin, IPPE, Obninsk) NUCLEAR DATA COMPLEX “ACDAM”.

The neutron energy in the range (10^{-5} eV - 20 MeV), endf-6 format

1. ACDAM/ACT –

ACTivation/**TR**ansmutation neutron Cross Section base to calculate the activation and transmutation (all known nuclear reactions) of materials.

704 target isotopes from H-1 to Po-210.

56 target isotopes from Th-228 to Cf-252.

EVALUATED DATA LIBRARIES:

FENDL/A-2,
EAF-99, BROND-2(3), ENDF/B-VI.3, IRDF-90, JENDL-3 (fission products), CENDL-2 (fission products).

Used the RF new evaluations on the basis of experimental and theoretical results and its systematization:

≈ 2600 nuclear reactions were updated and re-evaluated.

2. ACDAM/DeDaL –

DEcay **DA**ta **LI**brary is based on the EAF-99 and FENDL-2/D Decay Data Libraries.

≈1960 radioactive isotopes from H-3 to Cf-252.

3. ACDAM/DDDL –

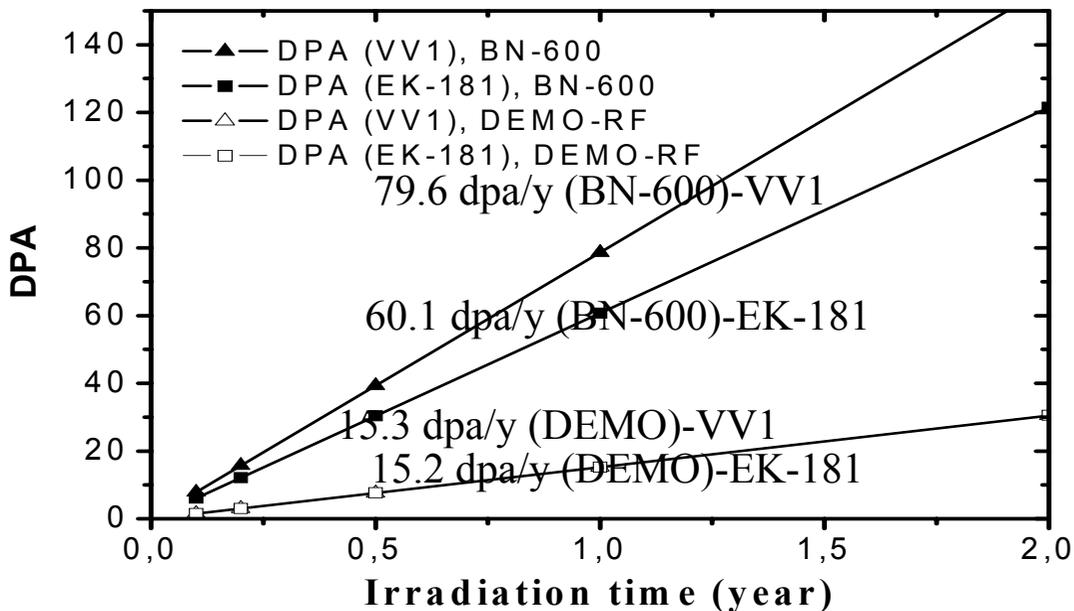
DAmage **DA**ta **LI**brary to calculate the primary radiation damage (dpa-NRT+IAEA recommendations) of all SM-compositions (from H-1 to Au-107).

The DDL library is based on processing of the general purpose data files from the ENDF/B-VI.3 and BROND-2(3) libraries.

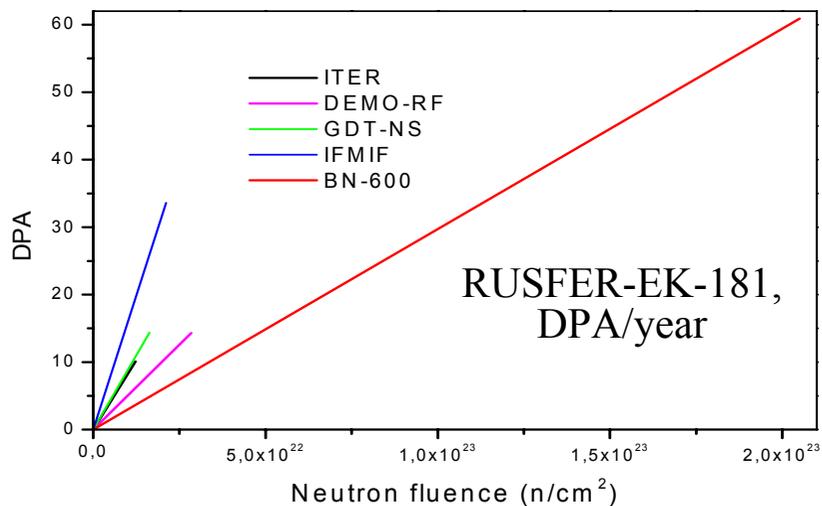
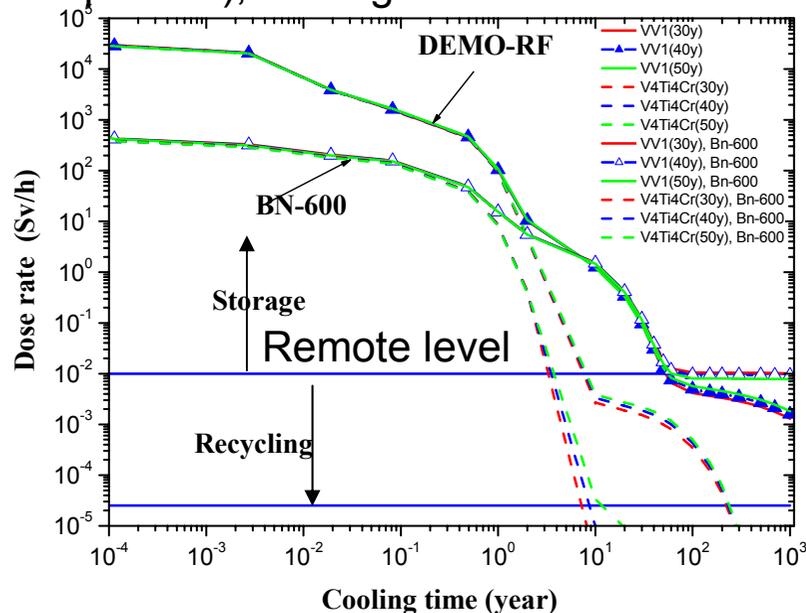
Atomic displacement Cross Sections (DPA) for all shifted nuclei produced via all nuclear elastic, inelastic, (n,2n), (n,p), (n,α), (n,γ) and so on reactions.

DPA Cross Sections were calculated by NJOY-97 package and the evaluated nuclear data files from ENDF/B-VI.8 and BROND-2(3) libraries.

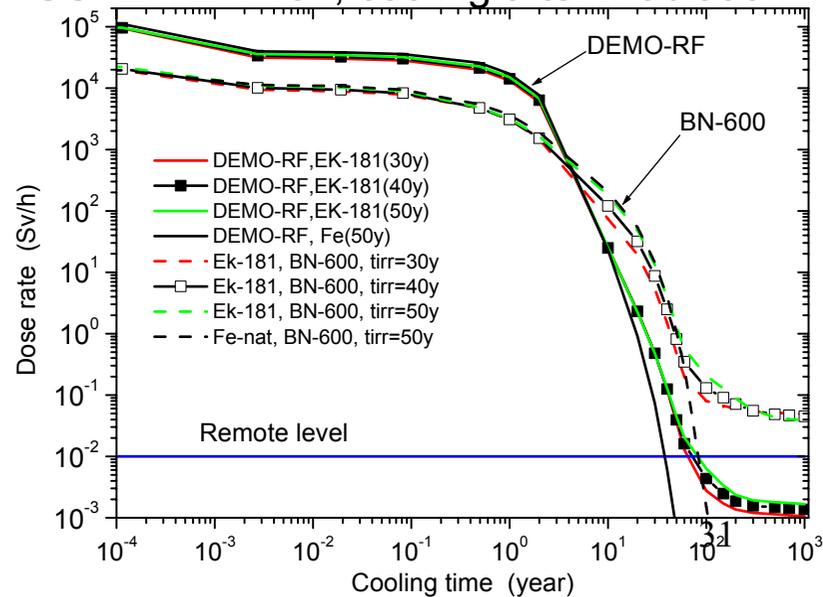
ACDAM: V-4Ti-4Cr(VV1)/RUSFER-EK-181 (EK-181): Radiation Damage, Activation, Cooling

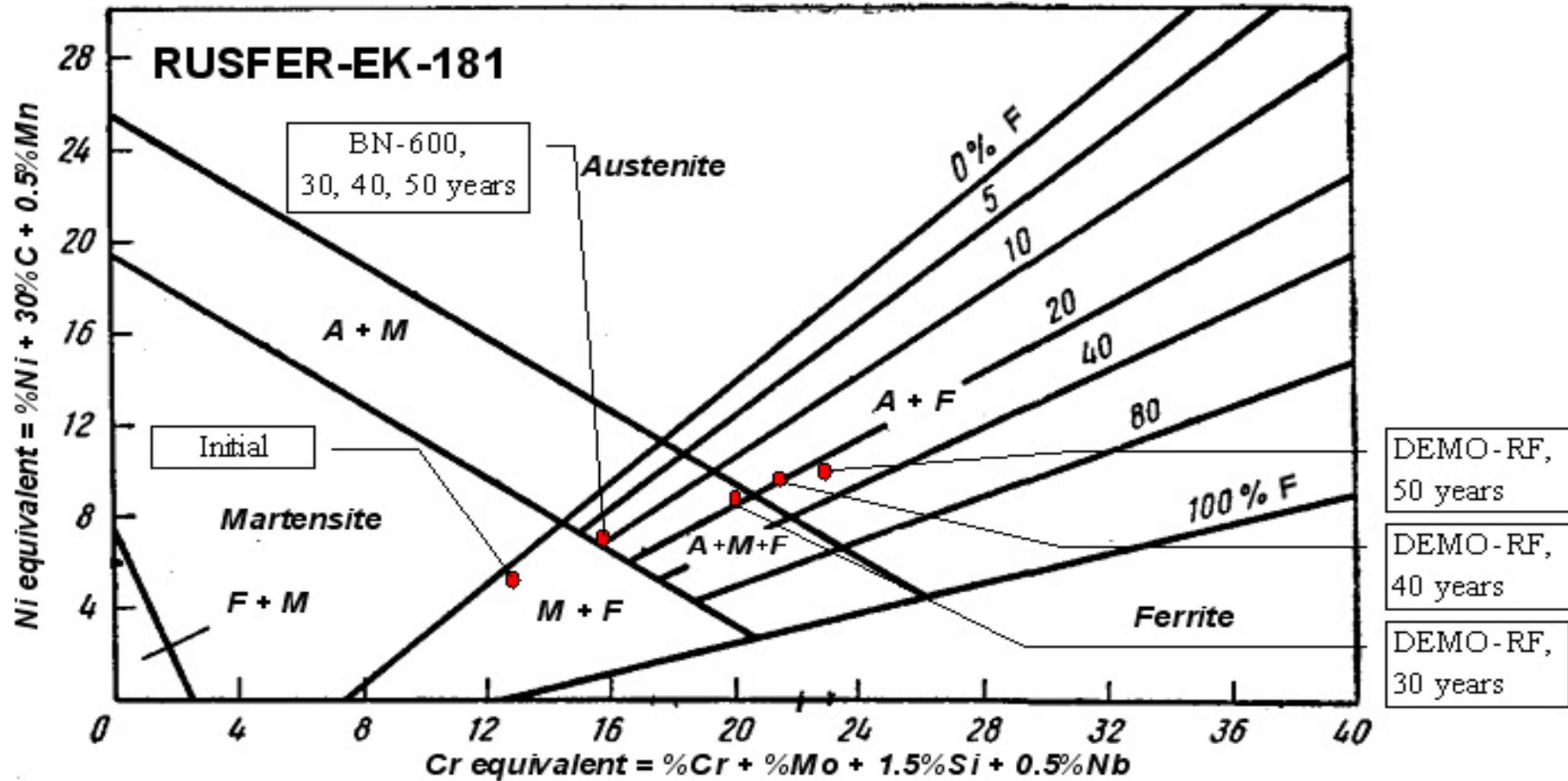


V-4Ti-4Cr (heat VV1) and V4Ti4Cr (no impurities), cooling after Irradiation



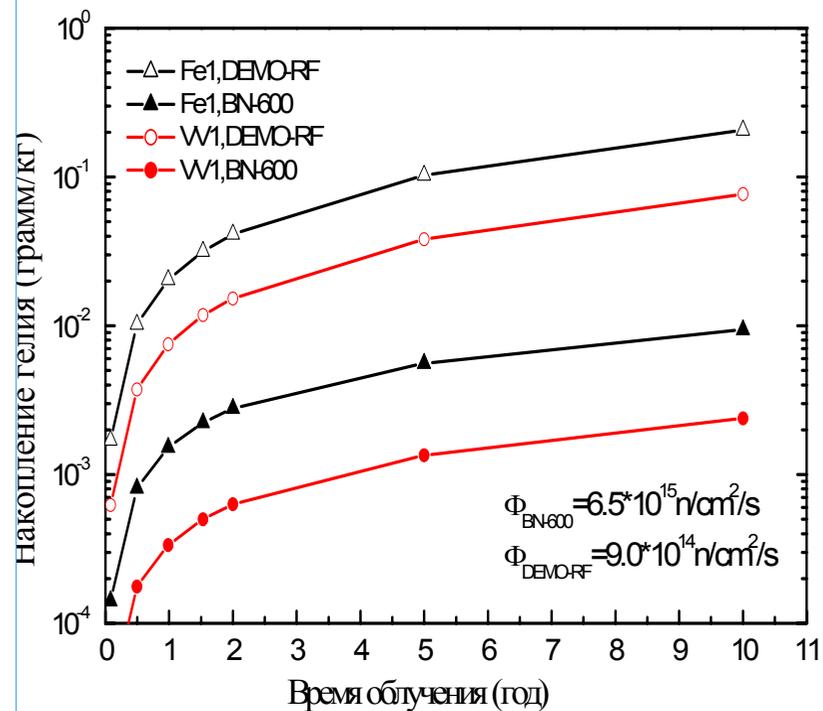
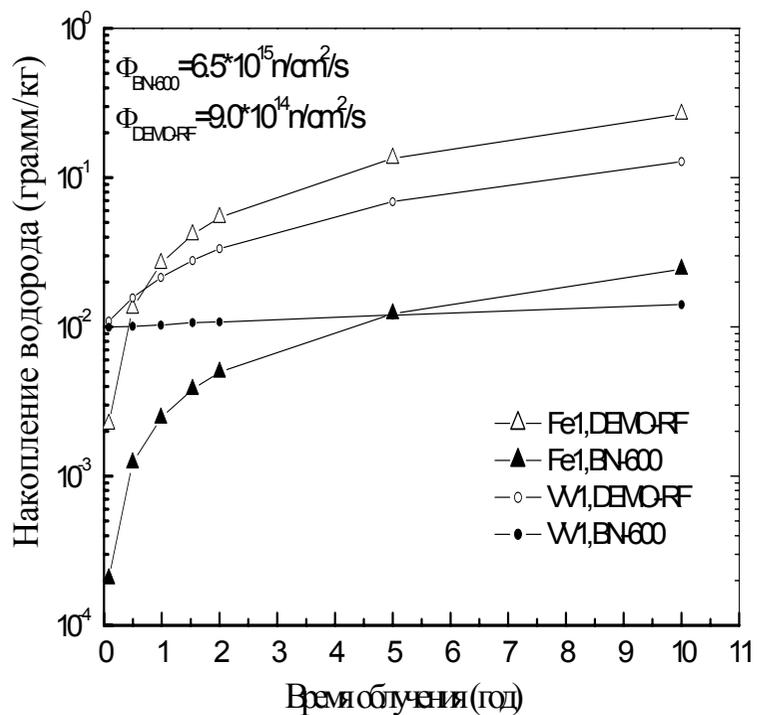
RUSFER-EK-181, cooling after irradiation



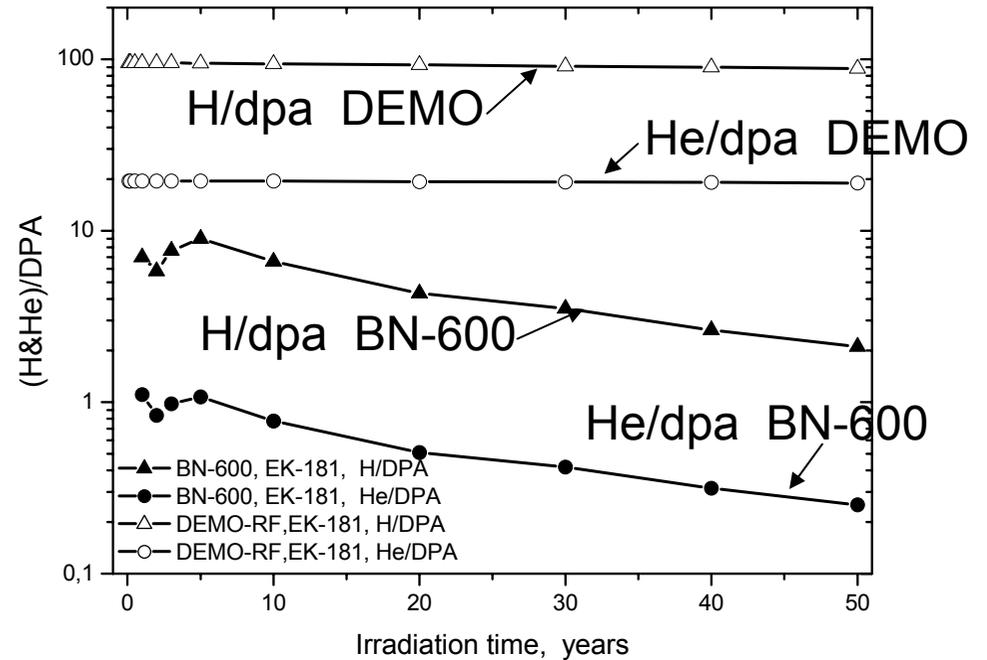
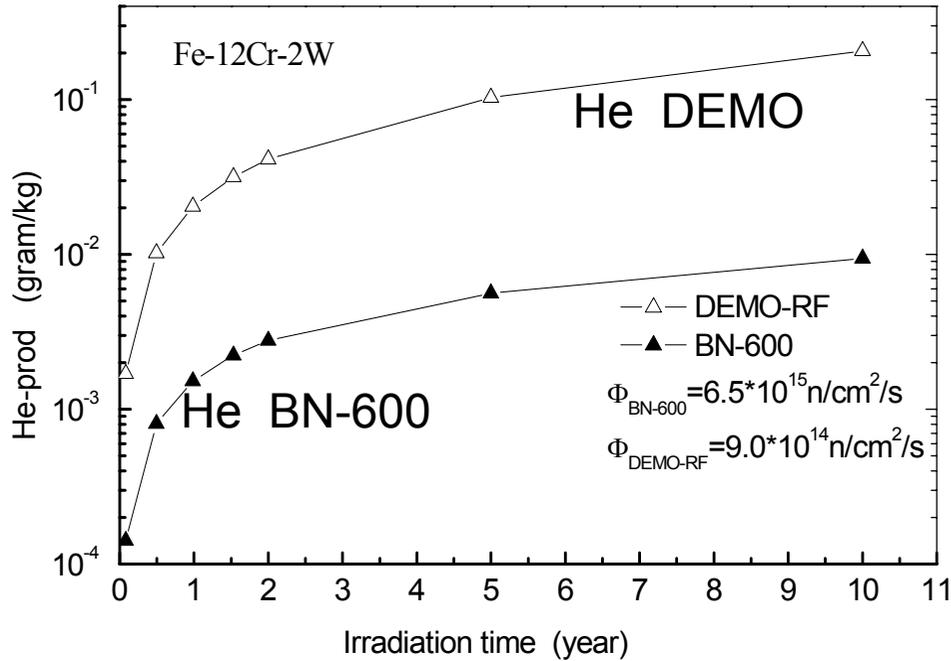


Scheffler diagram

Накопление водорода (г/кг) и гелия (г/кг) для стали ЭК-181 (Fe-1) и сплава V-4Ti-4Cr (VV1) в реакторах БН-600 и ДЕМО-РФ



ACDAM: He, H/DPA and He/DPA ratio for the RAFMS RUSFER-EK-181 irradiated in the BN-600 and DEMO-RF reactors.



How to compare and to predict the degradations of the radiation properties via H, He and dpa formations ?

**БН-600 эксперимент: 2010-2016 гг.
(ВНИИНМ, ОКБМ, ФЭИ, БАЭС, ИРМ).**

ЭК-181 (Fe-12Cr-2W-V-Ta-B, 60 сна/год):

2010-2014 ОБЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Температуры облучения 380-700 С, дозы 40-90(1)-160(2) сна, стандартные и малые образцы в проточном натрии.

V-4Ti-4Cr (80 сна/год):

2013-2016 – ОБЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЯ.

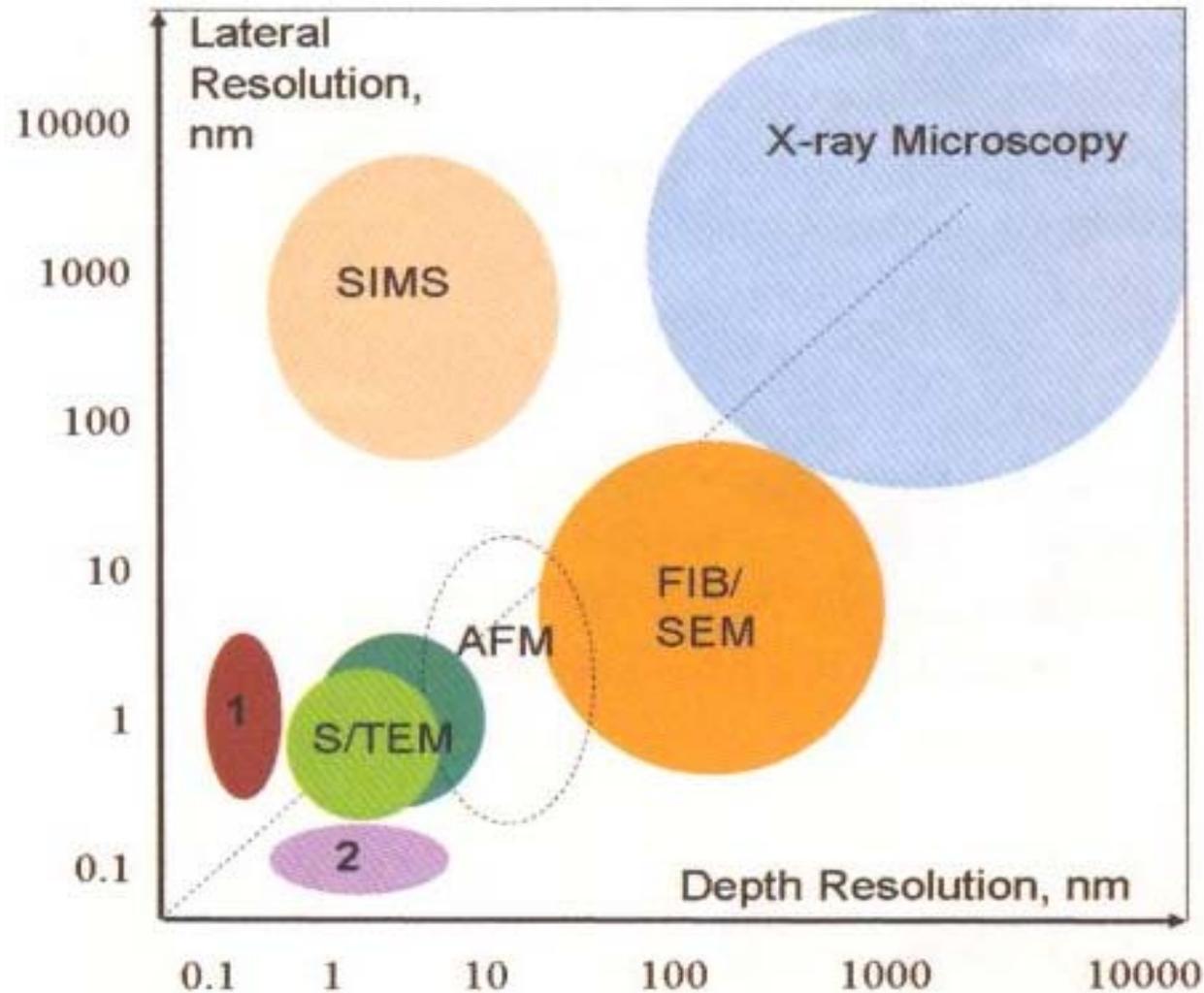
Температуры облучения 400-750 С, дозы 50-100(1) -180(2) сна, четыре герметичных капсулы с образцами (стандартные и малые) в литии и натрии.

СВОЙСТВА: Стандартные и Малые образцы:

упругие и микропластические, кратковременные механические; набухание, радиационная ползучесть (трубки под давлением); ударная вязкость, охрупчивание и разрушение; коррозия; микроструктура, структурные и фазовые превращения.

Length scales of micro-/nanotomography techniques showing lateral versus depth resolution ranges for anisotropic or isotropic techniques.

MATERIALSTODAY, 2007, v. 10, N 12



Green – Electron tomography.

1 = atom-probe tomography.

2 = scanning transmission electron microscopy (STEM) focal sectioning.

AFM = atomic force microscopy sectioning.

SIMS = secondary ion mass spectroscopy.

FIB/SEM = focused ion beam/scanning electron microscopy.

ЗАДАЧА – ПОНЯТЬ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКУЮ ПРИРОДУ РАДИАЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ И ПРЕДЛОЖИТЬ МНОГОУРОВНЕВЫЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ **МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ РАЗНЫХ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ (ГЦК-ОЦК-ГПУ)**

микро (< 1 нм) – нано (>1 нм)- мезо (>100 нм) – макро (>1000 нм)

- *Оценённые ядерные данные. Первичная радиационная повреждаемость (каскадная функция, сна). Активация. Трансмутация-Ядерное легирование. Охлаждение.*

- **Дисперсионное упрочнение и твердение. Контролируемый распад (старение) многокомпонентных твердых растворов замещения (легирующие металлы) и внедрения (С, О, N) с их ограниченными концентрациями. Диффузионная конкуренция фаз при формировании наноструктур при твёрдофазных реакциях.**

- Пределы текучести и прочности. Прерывистая текучесть. Локализация. Полосы деформации. Аномальное упрочнение. Масштабные факторы (микро-нано-мезо-макро).

- Радиационное набухание (ГЦК) и радиационное **неразбухание** (ОЦК).

- Радиационное упрочнение, ползучесть, разрушение. Влияние легирования и напряжений. Масштабные факторы.

- Низкотемпературное охрупчивание (хладноломкость) и радиационный сдвиг температуры хрупко-вязкого перехода **в синергетической связи** с жаропрочностью и жаростойкостью (ОЦК). Отсутствие эффекта НТРО в ГЦК-металлах.

- Усталостное разрушение и физические пределы выносливости (ГЦК, ОЦК).

- Радиационный рост (ГПУ).

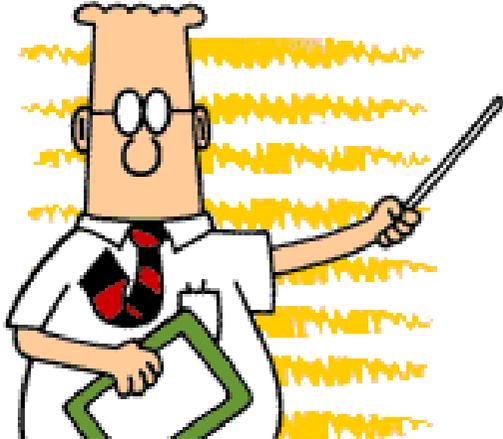
- **Кристаллографические, энергетические и диффузионные характеристики образования и кинетики собственных и примесных дефектов и их кластеров.**

- ЭВМ-моделирование и проектирование структуры и свойств **виртуальных** материалов на микро-нано-мезо-макро-уровнях полезно и потенциально могут дать новый стимул реальному материаловедению и технологиям

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спасибо за внимание и терпение.

**С БЛАГОДАРНОСТЬЮ И ГЛУБОЧАЙШЕЙ
ПРИЗНАТЕЛЬНОСТЬЮ
ФИЗИЧЕСКОМУ ФАКУЛЬТЕТУ (1957-1963 гг.),
КАФЕДРЕ ТЕОРИИ АТОМНОГО ЯДРА,
РУКОВОДИТЕЛЮ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ И ПЕРВОЙ
НАУЧНОЙ СТАТЬИ БАЛАШОВУ В.В.**



НЕВЗЯТЫЕ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ КРЕПОСТИ В ТЫЛУ МИРОВОЙ НАСТУПАЮЩЕЙ ЯДЕРНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

НЕИЗВЕСТНЫ (неясны) ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ И
ОТСУТСТВУЮТ МОДЕЛИ ВЫСОКОДОЗНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ И
СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С
РАЗНЫМИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ РЕШЕТКАМИ (ГЦК, ОЦК, ГПУ) ПРИ
ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ РАЗНОЙ ПРИРОДЫ И ИНТЕНСИВНОСТИ.

КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКТОР – ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ ОТ
КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО КЛАССА МЕТАЛЛА (ГЦК-ОЦК-ГПУ).

МАСШТАБНЫЙ ФАКТОР – ЗАВИСИМОСТЬ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
ОБРАЗЦОВ ОТ ИХ РАЗМЕРОВ.

МАСШТАБЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТРУКТУРНЫХ МЕТОДОВ:
МИКРО- НАНО - МЕЗО – МАКРО.

ЗАДАЧА – ПЕРЕХОД ОТ СВОЙСТВ ОБРАЗЦА К СВОЙСТВАМ МАТЕРИАЛА.

Наноструктурированный материал – функциональные свойства (прочность, жаропрочность)

ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СОСТАВОВ И РЕЖИМОВ ТМО:

1. Матрицы материалов должны растворять (малая растворимость): O, C, N.
2. Легирующие элементы должны находиться в твердом растворе при не слишком больших концентрациях (чем выше концентрация, тем грубее выделившиеся частицы – потеря когерентности).
3. Оксиды\карбиды\нитриды легирующих элементов должны обладать гораздо большей свободной энергией образования по сравнению с основным металлом матрицы (чем выше свободная энергия, тем мельче частицы).
4. Температуры ТМО и ХТО должны быть достаточно высокими для обеспечения быстрой диффузии O/C/N, но не слишком высокими (чем выше температура, тем крупнее частицы – потеря когерентности).
5. Выделение когерентных с матрицей частиц (преципитатов) и образование субструктуры в объёме для повышения прочности.
6. Выделение наночастиц по границам зерен для повышения температуры рекристаллизации.

THE FCC, BCC and HCP crystals – the base characteristics (planes and directions of glide, point defects) and typical properties

(-) - no or very small, (+) – there are, (++) – as the typical phenomena

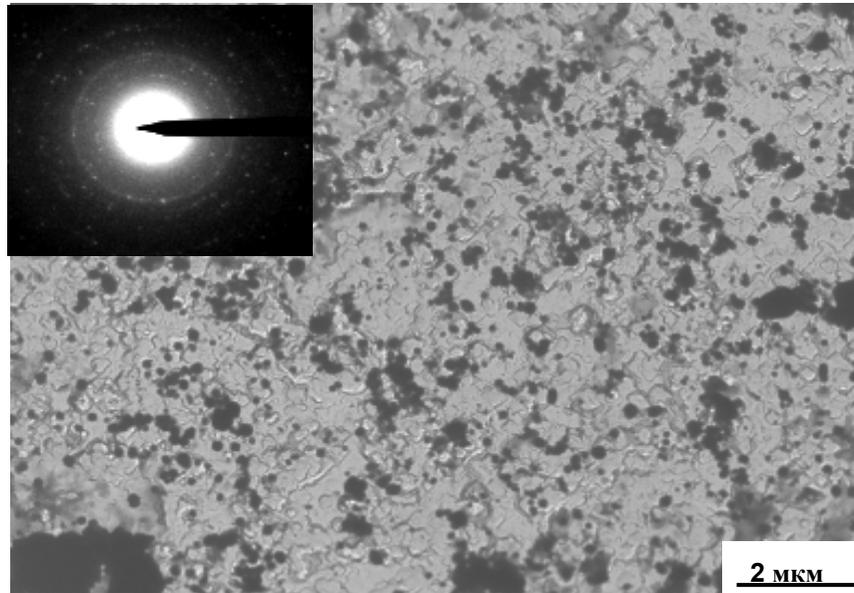
		FCC	BCC	HCP	
				1	2
Slip systems		{111}, {100} <110>	{110}, {112}, {123} <111>	{0001}, {1010}, {1011} <1120>, {1010} <0001>	{1011}, {2112} <2113>
Deformation by	glide	+	+	+	+
	twins	+	++	+	++
	creep	+	++	+	+
LTE / LTRE		–	++	–	+
Fatigue: Physical fatigue yield		+	++	+	++
Swelling		++	–(+)	+	–
Radiation growth		– (?)	–	+	++
Self point defects		<000>, <100>, <110>, <111> - elastic dipoles		trigonal, orthorombic, monoclinic and other elastic dipoles	
Impurity point defects					

ЦИРКОНИЙ

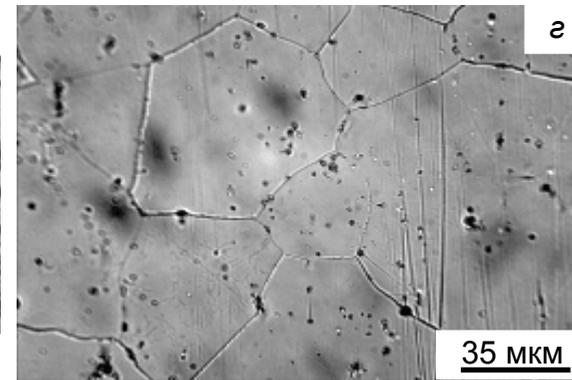
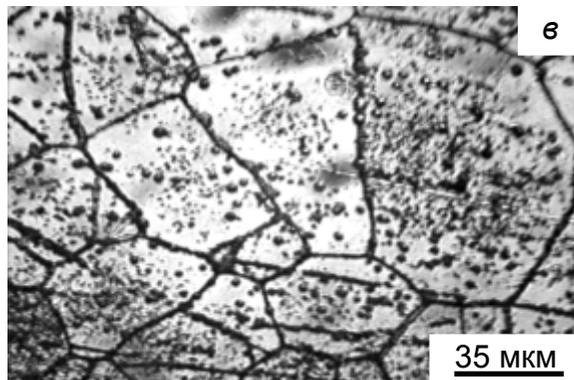
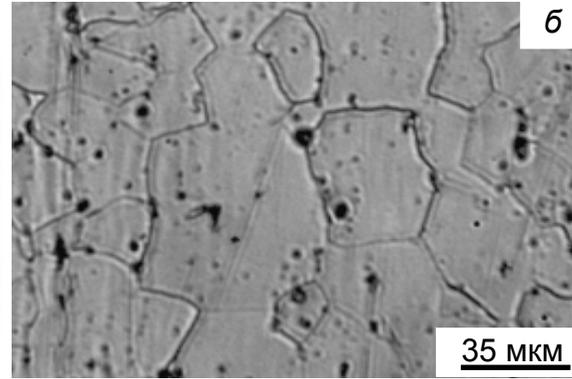
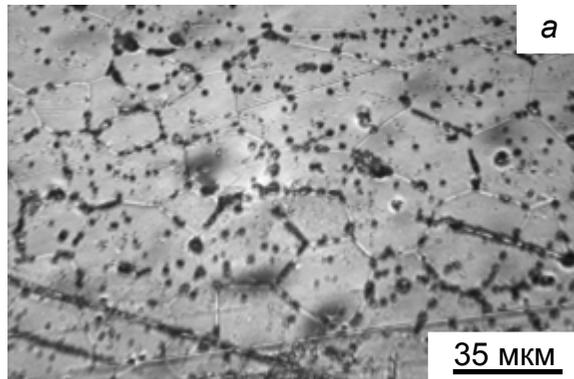
Время достижения уровней РБ (REMOTE Level = 10 мЗв/час, HANDS on Level = 0.025 мЗв/час) для сплавов циркония, облученными в течение времени $T_{irr} = 5, 15$ и 30 лет в центральной части реактора ВВЭР-1000

Сплавы («чистые»)	→“Remote level = 10 мЗв/час” (T_{irr} годы)			→“Hands-on-level = 0.025 мЗв/час“(годы)		
	5	15	30	5	15	30
Э-110: Zr-1Nb-0.05O	нет	нет	нет	нет	нет	нет
Ю-110: Zr-1Ta-0.05O	~5.2	~3.6	~4.5	~8.5	~130	~700
Э-635: Zr-1Nb-1.2Sn- 0.35Fe-0.09O	нет	нет	нет	нет	нет	нет
Ю-635: Zr-1Ta-1.2Sn- 0.35Fe-0.09O	~36	~50	~60	~80	~180	~800
Zr - натуральный	~4.8	~4.9	~4.9	~5	~5	~7.8

Частицы ZrO_2 в сплаве V-Cr-W-Zr после
отжига $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 1 час. $C_O \approx 2,1\text{ ат \%}$.



Микроструктура сплавов V-Cr-Zr и V-Cr-W-Zr после часовых отжигов при температурах ниже температуры собирательной рекристаллизации.



a –V-Cr-Zr, $T = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$; *б* –V-Cr-W-Zr, $T = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$;
в –V-Cr-Zr, $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$; *г* –V-Cr-W-Zr, $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$.