



Международный форум «АТОМЭКСПО-2010»,
Круглый стол «Возможности и перспективы использования управляемого термоядерного синтеза в решении проблем ядерной энергетики»,
Москва, 9 июня 2010 г.

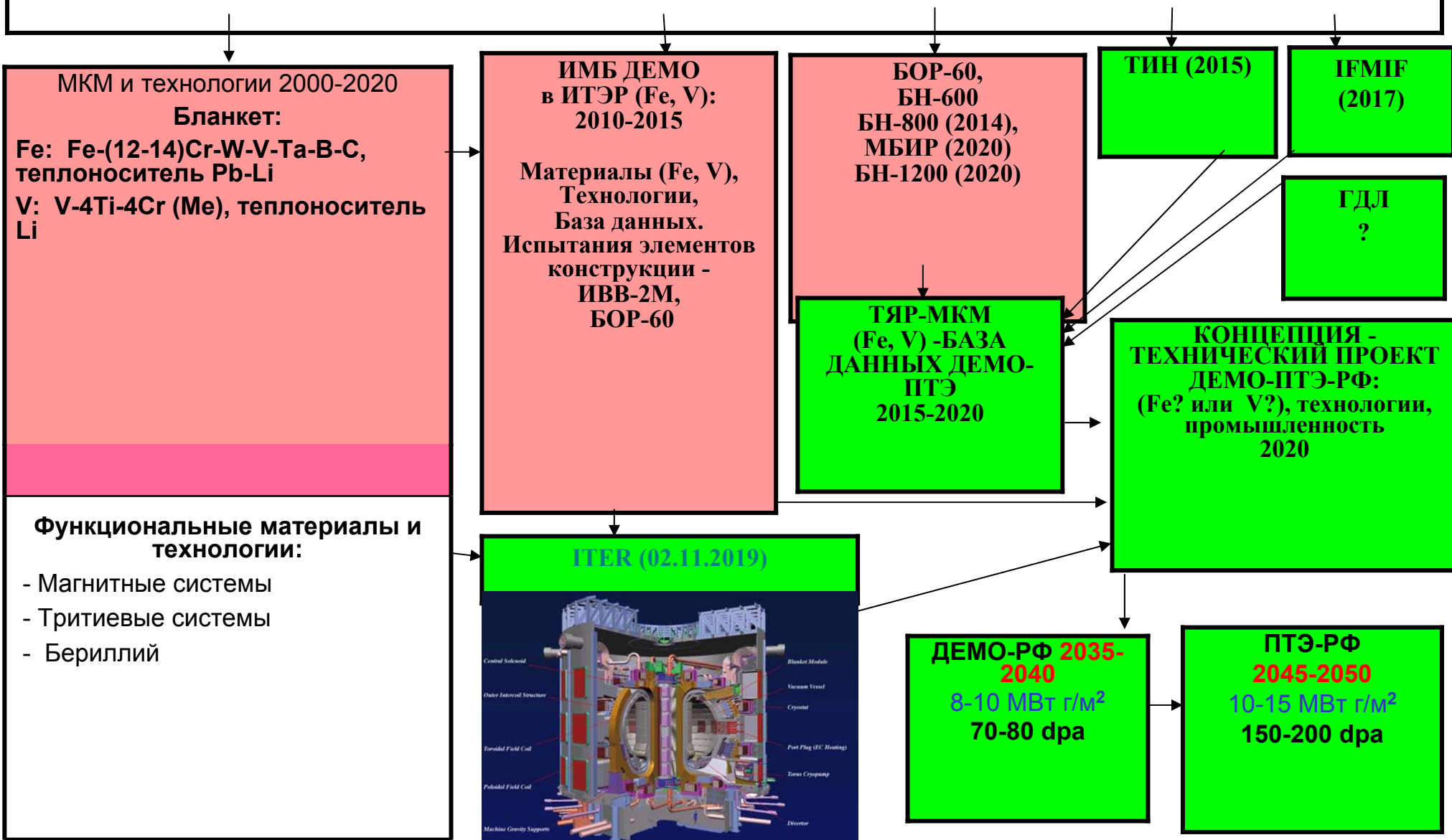
СОЗДАНИЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ТЕРМОЯДЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ

**В.М.Чернов,
М.В.Леонтьева-Смирнова, М.М.Потапенко**

**ОАО «Высокотехнологический НИИ Неорганических Материалов имени академика
А.А.Бочвара» (ОАО «ВНИИНМ»), Москва, Россия**

Путь России к ИМБ-ДЕМО-ИТЭР и ДЕМО-ПТЭ-РФ (2040-2050 гг.)

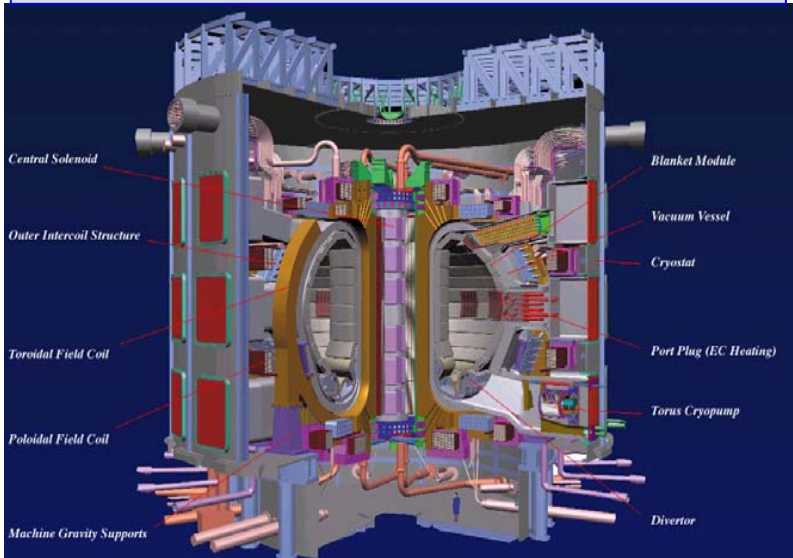
Малоактивируемые Конструкционные Материалы (МКМ) и Технологии (2000-2010)-(2011-2020). ОАО «ВНИИНМ» + Промышленность



ДЕМО-ПТЭ-РФ – РЕМОТ – ВРЕМЯ - ЧЕЛОВЕК – РОБОТЫ ?
РАДИАЦИОННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ – РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ.
РАДИАЦИОННАЯ РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ. ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

ТОЛЬКО МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ (МКМ)

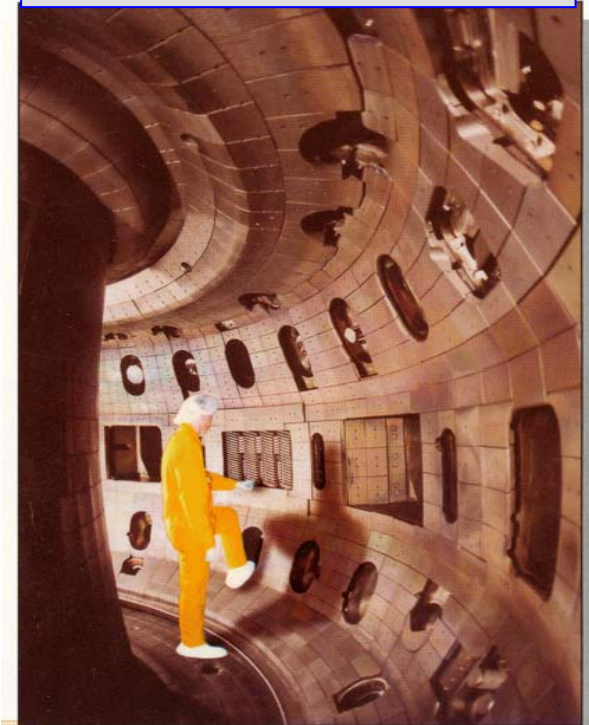
ITER



JET



D-IIID



Малоактивируемый материал – возврат (рециклирование) для повторного использования за срок менее 100 лет после прекращения нейтронного облучения

МКМ: ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ (2000-2010 гг.)

В значительной мере научные и технологические проблемы разработки требований к МКМ, выбора композиций (Fe,Cr,W,V,Ta,Ti,Si,C), разработки опытно-промышленных технологий получения слитков и изделий МКМ, в основном, решены.

СОЗДАНЫ И ПОЛУЧЕНЫ :

Сплавы ванадия (теплоноситель Li): V-4Ti-4Cr: опытно-промышленное производство слитков в России (ОАО «ВНИИНМ», вес до 110 кг), США (до 500 кг), Японии (до 160 кг), Китае (до 6 кг) и изделий из них.

Ф-М стали (теплоноситель Pb-Li): Fe-(8-14)Cr-W-V-Ta-B: промышленное производство слитков и изделий в России (RUSFER-EK-181), США, ЕС (EUROFER), Японии, Китае, Индии.

Дальнейшие усилия сосредоточены на реализации промышленных технологий получения больших высокочистых и высокоомогенных слитков МКМ и изделий из них гарантированного качества для создания реакторов типа ДЕМО.

МКМ: Обеспечение создания Нейтронных Источников (ТИН, ГДЛ), ИМБ-ДЕМО-ИТЭР, ДЕМО-РФ, ПТЭ-РФ

Задачи России (ОАО «ВНИИНМ» + Промышленность), 2000 - 2020 гг.:

1. Создать инженерную базу материаловедческих и технологических данных.
2. Обеспечить (в части МКМ) создание ИМБ-ДЕМО-РФ (~ 300-350 кг/модуль):
 - керамического: ф-м сталь ЭК-181 (RUSFER-EK-181): Fe-12Cr-2W-V-Ta-B-C/ Pb-Li,
 - самоохлаждаемого: сплав V-4Ti-4Cr/ Li.
3. Обеспечить (в части МКМ) участие России в реализации международного проекта реактора типа ДЕМО (вес изделий из МКМ ~900 тонн/реактор).
4. Обеспечить (в части МКМ) создание ДЕМО-ПТЭ-РФ (вес изделий из МКМ ~900 тонн/реактор).

РОССИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ИМЕЕТ ВСЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТАКИХ ЦЕЛЕЙ

МКМ: ТРЕБОВАНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ (ДЕМО-ПТЭ-РФ)

При эксплуатации (ДЕМО-РФ – нейтронная повреждаемость МКМ 15 сна/год):

- Тепловая нагрузка: 10 МВт год/м² (ДЕМО-РФ) - 15 МВт год/м² (ПТЭ-РФ),
- Нейтронная нагрузка: 90 сна (ДЕМО-РФ) - достигнута в БН,
150-200 сна (ПТЭ-РФ) – экспериментальных данных нет.

- Широкий Температурный Интервал $\Delta T = T_{min} - T_{max}$ с высокой энергоэффективностью преобразования энергии.

$T_{min} \leq 300$ C (ф-м стали, сплавы ванадия),

T_{max} от 700(710) C (ф-м стали) до 800(850) C (сплавы ванадия).

- Малое радиационное распухание (увеличение объёма $\Delta V/V < 5\%$ -требования для быстрых реакторов типа БН, Требований для ДЕМО-ПТЭ-РФ нет).
- Высокая чистота по примесям для обеспечения условий малой активируемости материалов. Минимальные радиационные воздействия на окружающую среду, в том числе при любых авариях.

После вывода из эксплуатации:

Быстрый спад накопленной активности (быстрое охлаждение) для последующей переработки (рециклирования) и возврата материалов для повторного использования за срок менее 100 лет после прекращения нейтронного облучения (требование малой активируемости материалов).

МКМ: НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЕМО-ПТЭ-РФ (ОАО «ВНИИНМ», 2000-2020 гг.)

1. Использование материаловедческого и технологического знания по разработке и эксплуатации конструкционных материалов для АЗ типа БН и БРЕСТ (БОР-60, БН-350, БН-600, БН-800, БН-1200, СВБР-100).
2. Развитие радиационного физико-механического, физико-химического и ядерно-физического материаловедческого знания о закономерностях и механизмах формирования функциональных свойств сталей и сплавов с разными кристаллическими решетками (ОЦК, ГЦК, ГПУ) и их изменений в температурных, механических, магнитных и радиационных полях.
3. Оптимизация композиционных составов (с учётом ядерных трансмутаций, ядерной наработки Н, He). Существенное повышение примесной чистоты - предельно низкие технологические минимумы концентрации примесей с учетом ядерных трансмутаций.
4. Разработка и создание гомогенных ультра-дисперсных (наноструктурированных) структур, специальных межзеренных границ и дислокационных субструктур.
5. Разработка и оптимизация методов термомеханических обработок материалов и изделий.
6. Создание инженерной базы материаловедческих и технологических данных.
7. Разработка опытно-промышленных технологий получения слитков и изделий.

МКМ: ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОЗДАНИЯ ИМБ-ДЕМО-ИТЭР, ДЕМО-РФ (ОАО «ВНИИНМ», Результаты 2000-2010 гг.)

1. Созданы жаропрочные и потенциально радиационно-стойкие технологичные МКМ высокой чистоты по примесям:

- Сплавы V-4Ti-4Cr, опытно-промышленное производство слитков весом 50-110 кг и изделий из них. Патенты и Ноу-Хау ОАО «ВНИИНМ». Рабочие температуры 300 С – 750(800) С. Экспериментальные данные до 50 сна. Стабильное структурно-фазовое состояние при нейтронном облучении. Диамагнетик.

Проблемы: повышение жаропрочности при одновременном ослаблении хладно-ломкости, создание технологий электро-изоляционных покрытий, функционально-стабильных в ж/м теплоносителях в магнитном поле, получение высокодозных нейтронных данных.

- Дисперсионно-твердеющая (наноструктурированная) ферритно-мартенситная сталь ЭК-181 (Fe-12Cr-2W-V-Ta-B-C). Промышленная технология, слитки 500-1000 кг и изделия из них. Патенты ОАО «ВНИИНМ». Рабочие температуры 300 С – 670(700) С. Экспериментальные данные до 15 сна.

Проблемы: повышение жаропрочности при одновременном ослаблении хладно-ломкости, создание технологий электро-изоляционных покрытий, функционально стабильных в ж/м теплоносителях в магнитном поле, ядерное изменение структурно-фазового состояния (ядерные трансмутации основных элементов), получение высокодозных нейтронных данных, влияние магнитных полей (синергетическая система «ферромагнетик-магнитное поле»).

2. Для проведения высокодозных (40-160 сна) и высокотемпературных (400 – 800 С) испытаний образцов МКМ в реакторе БН-600:

- Разработан Технический проект для облучения образцов сплава V-4Ti-4Cr.
- Разработан Рабочий проект и изготовлена Экспериментальная материаловедческая сборка для облучения образцов стали ЭК-181.

МКМ: ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОЗДАНИЯ ДЕМО-ПТЭ-РФ
(ОАО «ВНИИНМ», Результаты 2000-2010 гг., продолж.)

3. Созданные Базы материаловедческих, ядерно-физических и технологических знаний для МКМ (сплав V-4Ti-4Cr, сталь ЭК-181) в основном достаточны для обеспечения ближайшего этапа создания термоядерной энергетики (ИМБ-ДЕМО-РФ, ДЕМО-РФ).

4. ОАО «ВНИИНМ» + Промышленность потенциально способны обеспечить МКМ (сплав V-4Ti-4Cr, сталь ЭК-181), другими материалами и изделиями из них создание ИМБ-ДЕМО-РФ в ИТЭР (самоохлождаемого и керамического).

5. ОАО «НИКИЭТ», ФГУП «НИИЭФА», ОАО «ВНИИНМ» + Промышленность потенциально способны разработать конструкции ИМБ-ДЕМО-РФ (самоохлождаемый и керамический), испытать их элементы в реакторах (ИВВ-2М, БОР-60), изготовить ИМБ-ДЕМО-РФ и поставить их на площадку ИТЭР в плановые сроки.

Изготовление и испытания ИМБ-ДЕМО-РФ в ИТЭР принципиально важны для разработки концепции ДЕМО-РФ в первой половине 21-го века.

6. Для обеспечения ПТЭ-РФ МКМ (100-200 сна) требуются дальнейшие значительные научно-технические целенаправленные теоретические, моделирующие и экспериментальные исследования в области высокодозного (до 200 сна) радиационного материаловедения для сталей и сплавов с разными кристаллическими решетками (ОЦК, ГЦК, ГПУ) и в разных структурно-фазовых состояниях.

МКМ: ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОЗДАНИЯ ДЕМО-ПТЭ-РФ (ОАО «ВНИИНМ», Планы 2011-2015 гг., продолж.)

1. Провести реакторные испытания МКМ (ЭК-181, V-4Ti-4Cr) :
 - Высокодозные (40-160 сна) и высокотемпературные (400-800 С) в реакторе БН-600 (проблема жаропрочности),
 - Среднедозные (15-60 сна) при температурах облучения 300-400 С в реакторе БОР-60 (проблема хладноломкости).
2. Провести измерения физико-механических, тепло-физических и ядерно-физических характеристик облученных материалов для создания инженерной базы оцененных материаловедческих данных.
3. Провести фундаментальные теоретические, моделирующие, расчетные и экспериментальные исследования по нейтронике, уточнению механизмов, закономерностей и моделей дефектов, радиационных явлений и свойств при нейтронных облучениях в разных нейтронных источниках (БОР-60, ИВВ-2М, БН-600, БН-800, БН-1200, ТИН, IFMIF, ДЕМО-РФ, ПТЭ-РФ).
4. Разработать технологии нанесения электро-изоляционных покрытий для МКМ в среде жидко-металлических теплоносителей Li/Pb-Li (существенное уменьшение МГД-эффекта).

МКМ: ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОЗДАНИЯ ДЕМО-ПТЭ-РФ (ОАО «ВНИИНМ», Планы 2011-2020 гг., продолж.)

5. Разработать новые малоактивируемые нано-структурированные высокочистые и высокоомогенные сплавы системы V-Ti-Cr (Me,C) и создать их опытно-промышленное производство (слитки 100-300 кг и изделия из них), обеспечивающих рабочие температуры <300 С – 800(850) С и нейтронные нагрузки 100-200 сна.

6. Модифицировать малоактивируемые (с быстрым спадом активности) дисперсионно-твердеющие (нано-структурированные) ферритно-мартенситные стали типа ЭК-181 и создать промышленные технологии производства изделий из них, обеспечивающих

рабочие температуры <300 С – 700(710) С и нейтронные нагрузки 100-200 сна.

7. Исследовать и реализовать возможности изучения свойств МКМ в процессе облучения в интенсивных нейтронных источниках термоядерных нейтронов (ТИН, IFMIF, ГДЛ).

8. Создать базы оцененных материаловедческих, тепло-физических и ядерно-физических данных (нейтронные дозы 40-200 сна, температуры 20-800 С) для МКМ (сплавы ванадия, Ф-М стали) в обеспечение разработки концепции ДЕМО-ПТЭ-РФ (на основе материаловедческих баз данных для Быстрых Энергетических Реакторов).

9. Определить наиболее приоритетный МКМ (сплав ванадия или ф-м сталь) для создания ДЕМО-ПТЭ-РФ.

Все задачи 2011-2020 гг. актуальны, обоснованы и реализуемы.

Учитывая масштабы уже предпринятых усилий (2000-2010 гг.) и полученных при этом материаловедческих и технологических результатов, маловероятно быстрое решения указанных задач (пп. 1-9) без большого объёма целенаправленных фундаментальных, материаловедческих и технологических исследований и усиления взаимодействия между материаловедами, технологами и конструкторами на пути России к ДЕМО-ПТЭ-РФ (2040-2050 гг.).

РОССИЯ (ОАО «ВНИИНМ» + ПРОМЫШЛЕННОСТЬ) ПОТЕНЦИАЛЬНО ИМЕЕТ ВСЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО ПРОМЫШЛЕННОГО СОЗДАНИЯ МКМ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ДЕМО-ПТЭ-РФ В ПЛАНИРУЕМЫЕ СРОКИ



**“НАШЕ БЛИЗКОЕ БУДУЩЕЕ –
ГигаДжоули ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА”**

ДЕМО-ПТЭ-РФ должны быть построены до 2050 года !

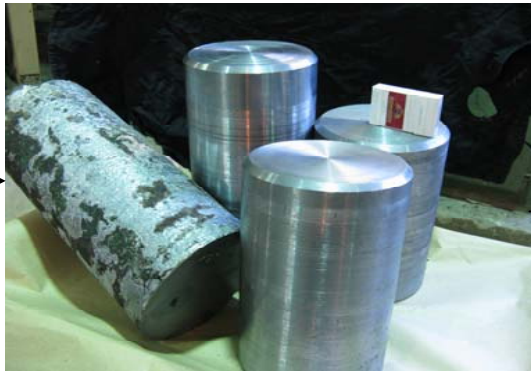
Спасибо за внимание и терпение

Сплав V-4Ti-4Cr: Слитки и изделия для ИМБ-ДЕМО-ИТЭР (ОАО «ВНИИНМ», 2000 – 2009 гг.)

2000.
ЛИТКИ:
45-50 кг



2008.
Слитки: 50-55 кг



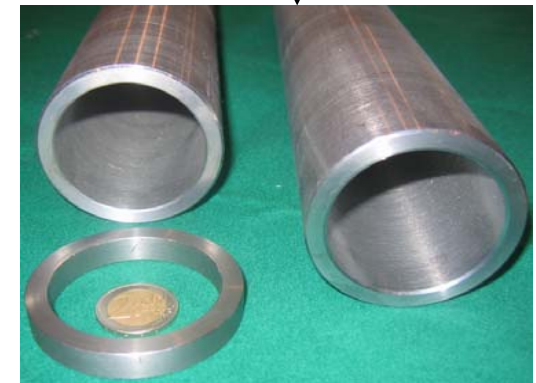
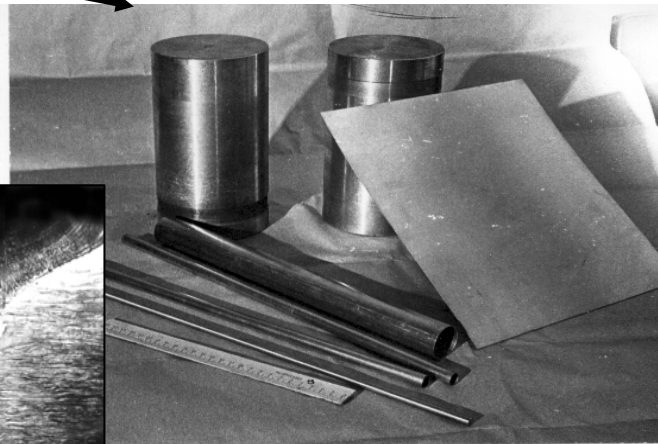
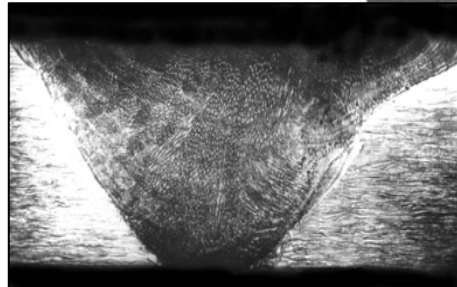
2009.
Слитки: 100-110 кг



2012.
Слитки: 300 кг

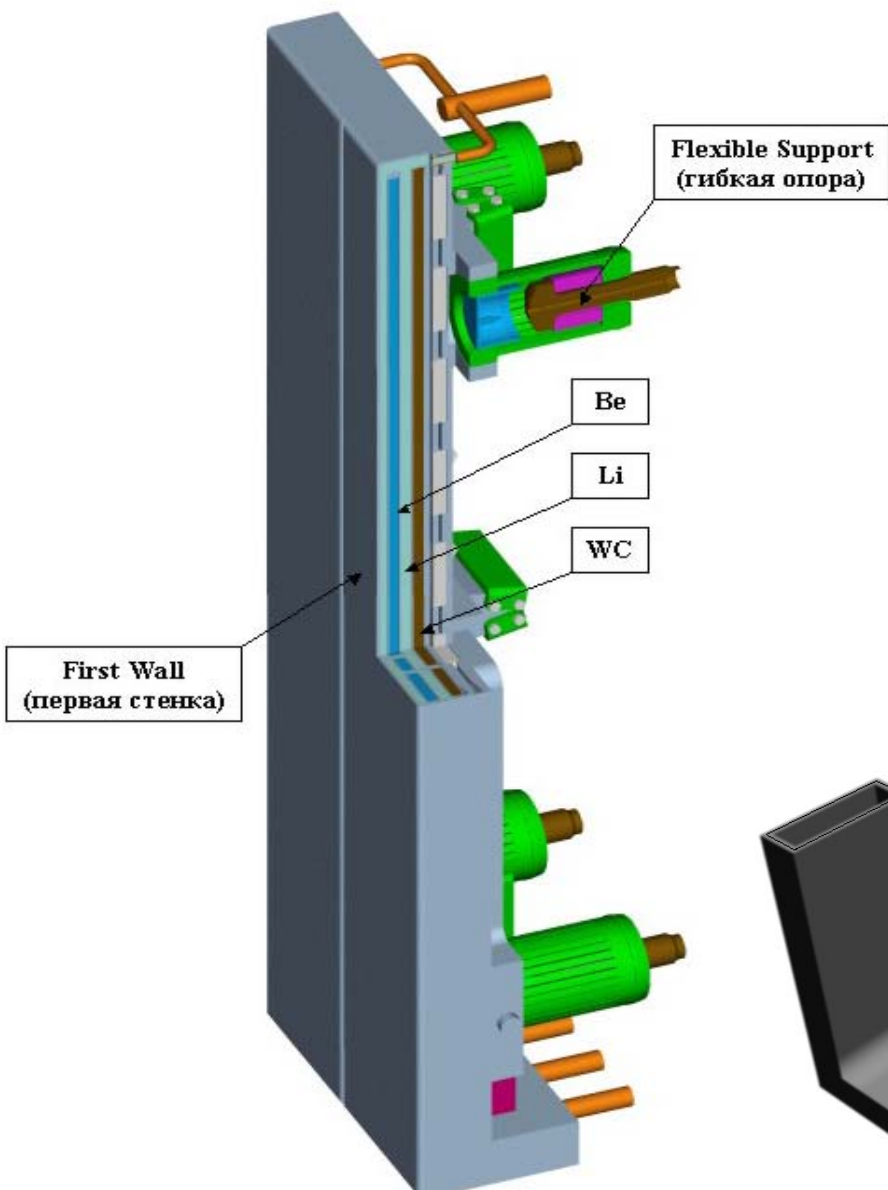


Слиток 50 кг:
-трубы $75 \times 5 \div 20 \times 1$ мм,
-профили $120 \times 20 \times 5$ мм;
-листы $1930 \times 367 \times 5$ мм;
-сварка (листы 2-6 мм)



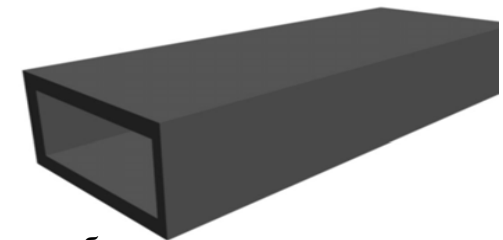
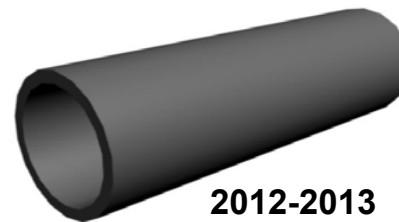
- листы $1930 \times 367 \times 15$ мм;
- листы $1500 \times 257 \times 80$ мм,
- трубы 67×6 мм

ФГУП НИИЭФА: Самоохлаждаемый ИМБ-ДЕМО-РФ в ИТЭР

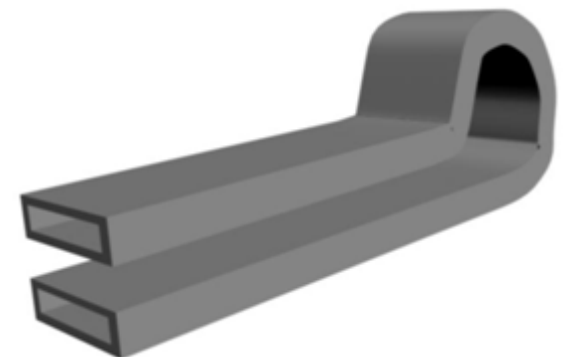


ОАО «ВНИИНМ» + Промышленность
потенциально может изготовить ИМБ

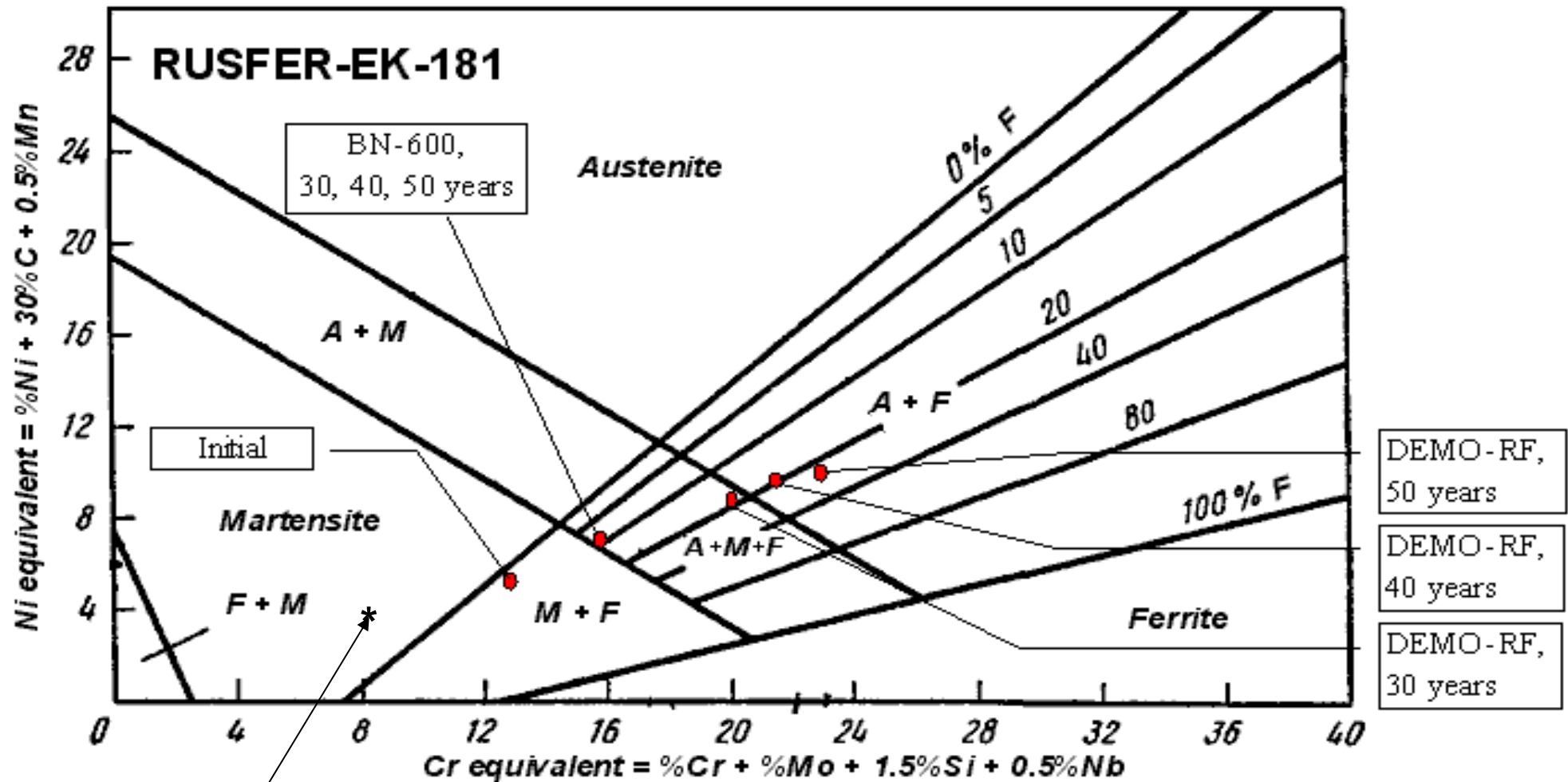
V-4Ti-4Cr: изделия для ИМБ, вес 330 кг



двойные и тройные разнопрофильные трубы:
Ф-м сталь - Сплав ванадия,
Сплав ванадия – Изолятор -Сплав ванадия



RUSFER-EK-181: DEMO-RF, BN-600: Nuclear Transmutations (ACDAM)



EUROFER97

Scheffler diagram

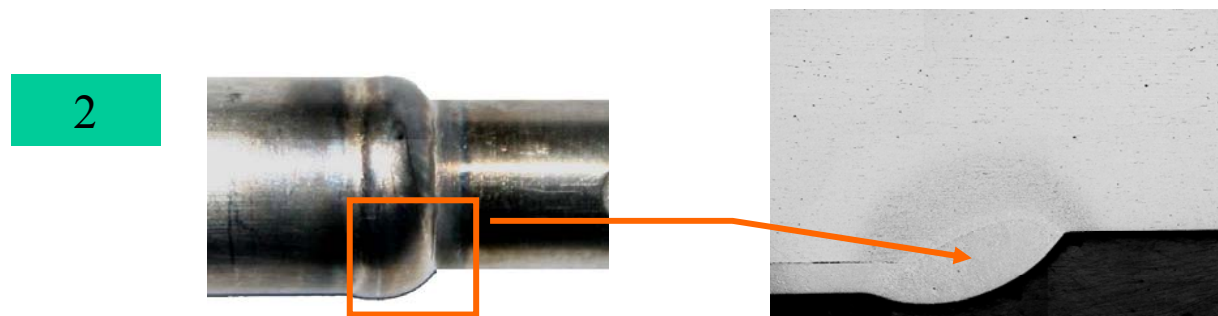
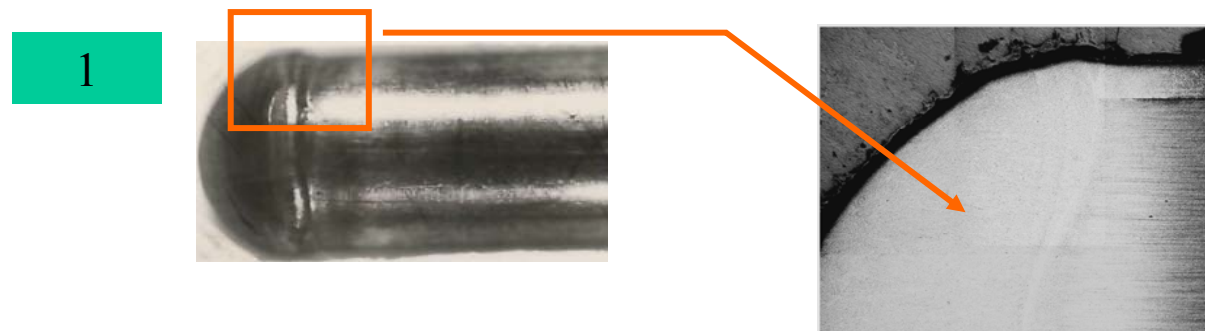
ОАО «ВНИИНМ». Ф-М сталь ЭК-181: Сварка

Общий вид сварных соединений труб $\varnothing 6.9 \times 0.4$ мм



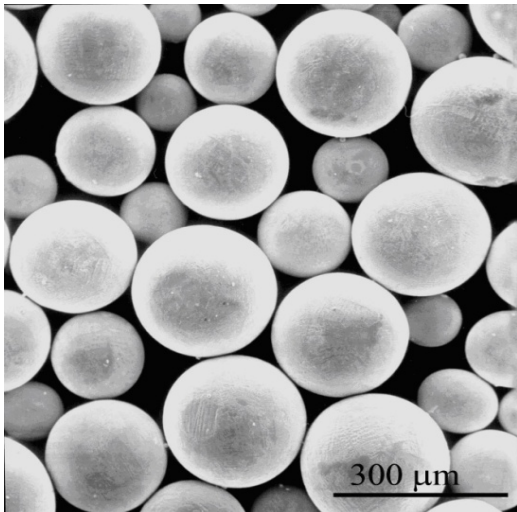
Имеются технологии для АЗ БОР-60 и БН-600.

Для целей ДЕМО-ПТЭ-РФ требуются технологии с ориентацией на конкретную конструкцию толстостенных изделий.



Микроструктура сварного соединения

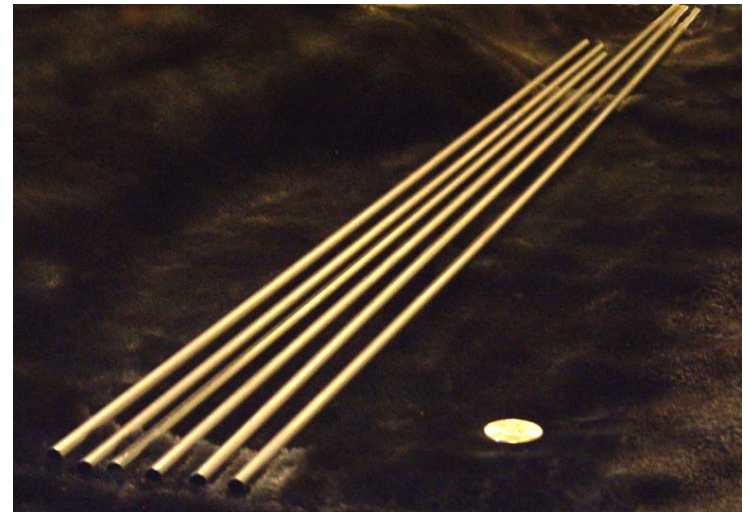
JSC “VNIINM” : Nanostructured FMS EP-450-ODS



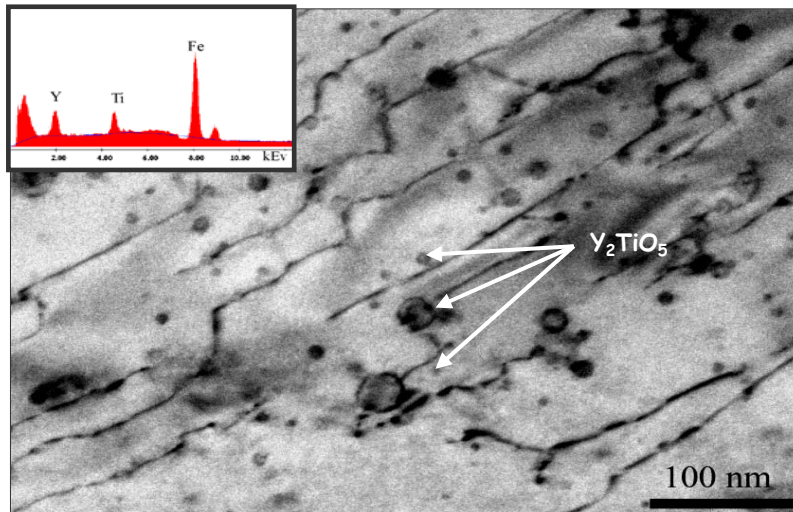
Matrix powder



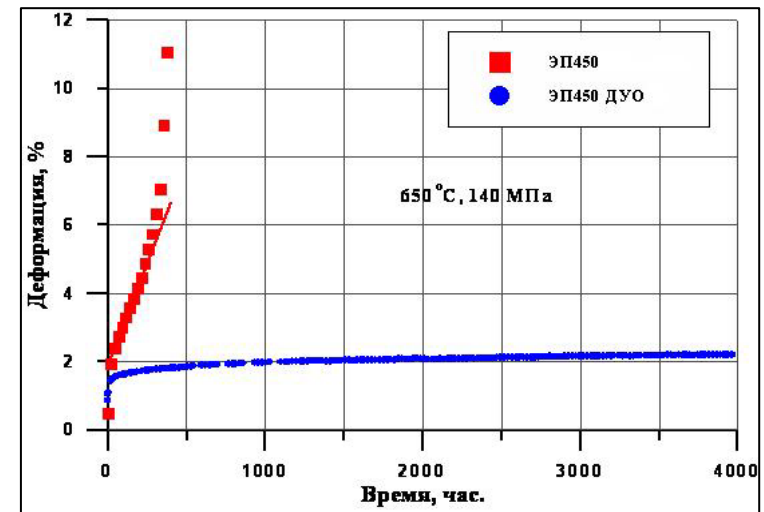
Tube billet



Specially thin-walled tubes



Nano-oxides in steel EP-450-ODS



Thermal creep of steels EP-450 and EP-450-ODS

Проведение фундаментальных теоретических, моделирующих и экспериментальных исследований, создание информационных систем и баз данных, результативно обеспечивающих:

- Обобщение, оценку и обработку имеющейся экспериментальной, теоретической и расчетной информации по дефектам, микроструктурам и свойствам облучённых материалов в других нейтронных спектрах с экстраполяцией на условия ДЕМО-ПТЭ-РФ.
- Многоуровневое моделирование дефектов, микроструктуры и свойств материалов, ещё недоступных экспериментальным исследованиям (нано-микро-макро-модели), в том числе в процессе высокодозного облучения в разных нейтронных спектрах:
 - быстрые энергетические реакторы БН-600, БН-800, БН-1200.
 - интенсивные нейтронные источники термоядерных нейтронов (ТИН, IFMIF, ГДЛ).
 - термоядерные энергетические реакторы ДЕМО-ПТЭ-РФ.

Исследования дефектов и микроструктуры высокоразрешающими структурными и ядерно-физическими методами (нейтронные, синхротронные, электронно-микроскопические, ядерно-физические, акустические, мессбауэровские).



АКТУАЛЬНЫ И НЕОБХОДИМЫ:

- Новые физико-механические, физико-химические и ядерно-физические знания о механизмах влияния композиционных составов, в том числе ядерного легирования, кинетики и динамики радиационной повреждаемости на формирование и изменения наноструктурированных состояний и функциональных свойств (жаропрочность, хладноломкость, распухание, ползучесть) МКМ при высокодозных нейтронных нагрузках в зависимости от типов и интенсивностей нейтронных, температурных, механических и магнитных полей.
- Более ясное понимание физико-механической сущности масштабного эффекта в системе «образец - материал» для определения свойств материалов (технологии «малых» и «стандартных» образцов).
- Новые металлургические и обрабатывающие технологии получения и переработки больших слитков ф-м сталей и сплавов ванадия высокой чистоты с оптимизацией режимов термо-механических обработок для повышения жаропрочности и радиационной стойкости.
- Высокодозные (30 - 160 сна) в широком температурном интервале (300-800 С) испытания МКМ в быстрых реакторах (БОР-60, БН-600).
- Исследование возможностей изучения свойств в процессе нейтронного облучения и их реализация в интенсивных нейтронных источниках термоядерных нейтронов (ТИН, IFMIF, ГДЛ).