

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**«ПРОМЕТЕЙ»**

ИМЕНИ И. В. ГОРЫНИНА

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ КОРПУСОВ  
РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК РИТМ-200 УНИВЕРСАЛЬНЫХ АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ  
ПРОЕКТА 22220**

**КАШТАНОВ Александр Дмитриевич**

Д.Т.Н.



*Санкт-Петербург*

Для водо-водяных АЭУ создана высокорадиационнотойкая сталь 15Х2МФА-А (сталь с контролируемо низким уровнем примесей), которая прошла ряд усовершенствований с целью обеспечения создания новых типов корабельных АЭУ

**I поколение**

Пр. 627А

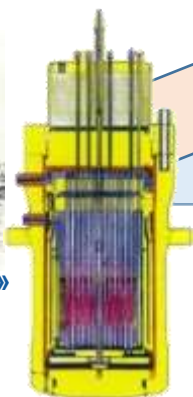


**25Х3МФ(48ТС)**

Петлевая компоновка ВМ-1



АПЛ «Ленинский комсомол»  
Корпус: 38Х3НМФА  
Крышка: (48ТС)



**II поколение**

Пр. 667  
Пр. 670  
Пр. 671



**15Х2МФА (48ТС-3-40)**

Блочная компоновка ОК-300; ОК-350; ОК-700

Ресурс 20 лет

**III поколение**

Пр. 941 «Акула»  
Пр. 949 «Гранит»  
Пр. 971 «Барс»



**15Х2МФА-А Модификация А**

Блочная компоновка ОК-650

ЭП302-Ш  
10Х15Н9СЗБ-Ш

Пр. 645  
Пр. 705  
Пр. 705К  
Всего 8 единиц



Петлевая компоновка ОК-550

Ресурс более 60 лет

Водо-водяные реакторы

**IV поколение**

Пр. 955 «Борей»  
Пр. 885 «Ясень»



**15Х2МФА-А Модификация А и Б**

Интегральная компоновка Митра-А КТП-6

Заказ перспективной лодки  
Перспективная аустенитная сталь марки **04Х15Н11С3МТ**



Интегральная компоновка

Быстрые реакторы со свинцово-висмутовым теплоносителем

Для реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем создана высокорадиационнотойкая и коррозионнотойкая перспективная аустенитная сталь

Разработанные материалы обеспечили существенное (более чем двукратное) повышение ресурса и уровня безопасности работы корабельных АЭУ

# МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК АТОМНОГО ЛЕДОКОЛЬНОГО ФЛОТА

## РАЗВИТИЕ ЛЕДОКОЛЬНЫХ АЭУ

ОК-150, ОК-900  
(1959–1970)

ОК-900,  
КЛТ-40  
(1970–2007)

РИТМ-200,  
РИТМ-400  
(2016–н.в.)

38ХНЗМФА,  
ТС-3-40  
~ 140 мм

15Х2МФА  
400–480 мм

15Х2МФА-А мод. А  
580–660 мм  
108 заготовок, 140т

★ толщина стенки корпуса реактора под термообработку



ПЕРВЫЙ АТОМНЫЙ ЛЕДОКОЛ «ЛЕНИН»



Ресурс РУ  
**25**

Петлевая  
компоновка

Тепловая мощность 90 МВт  
«Ленин»  
ОК-150: 7 лет,  
ЩК-900: 19 лет.

Ресурс РУ  
**35**

Блочная  
компоновка

Тепловая мощность  
1 реактора: 135 МВт  
«Арктика»  
«Сибирь» «Россия»  
«Севморпуть»  
«Советский Союз»  
«Таймыр» «Вайгач»  
«Ямал» «50 лет Победы»  
«Академик Ломоносов»



Ресурс РУ  
**40**

Интегральная  
компоновка



Тепловая мощность  
1 реактора: 175 МВт

«Арктика»  
«Сибирь» «Урал» «Якутия»

Проекты:  
Многофункциональный атомный ледокол оффшорного типа (РИТМ-200Б)  
ПЭБ (РИТМ-200М)  
Атомный ледокол «Лидер» (РИТМ-400),  
2 реактора по 315 МВт,  
эл. мощность – 120 МВт



Новые конструкционные материалы для корпусов АЭУ обеспечивают их безопасную эксплуатацию до флюенса  $4 \times 10^{20}$  нейтр/см<sup>2</sup>. (40 лет). Максимальная толщина заготовок под термическую обработку – 670 мм.

Разработанные основные и сварочные материалы обеспечивают проектирование и строительство АЭУ на базе ВВЭР для **новых двухосадочных атомных ледоколов (проект РИТМ-200, реактор интегрального типа)**. Сварочные материалы обеспечивают равнопрочность сварных швов и отсутствие теплового старения.



## РИТМ-200М

Реакторная установка для оптимизированных плавучих энергоблоков



Ледоколы проекта 22220 «Арктика», «Сибирь», «Урал», «Якутия», «Чукотка»

Тепловая мощность 1 реактора: 175–315 МВт

Проекты:  
Многофункциональный атомный ледокол оффшорного типа (РИТМ-200Б)  
ПЭБ (РИТМ-200М)

## РИТМ-400

Реакторная установка для атомного ледокола проекта «Лидер»



Атомный ледокол «Лидер»

2 реактора по 315 МВт, мощность – 120 МВт

Освоение серийного производства заготовок КР РУ РИТМ-200 явилось базой для начала работ по созданию КР РУ РИТМ-400 для ледокола-Лидера.



Новые конструкционные материалы для корпусов АЭУ обеспечивают их эксплуатацию до флюенса  $4 \times 10^{20}$  нейтр/см<sup>2</sup>.

Максимальная толщина заготовок под термическую обработку – 670 мм.



**Ледоколы проекта 22220**

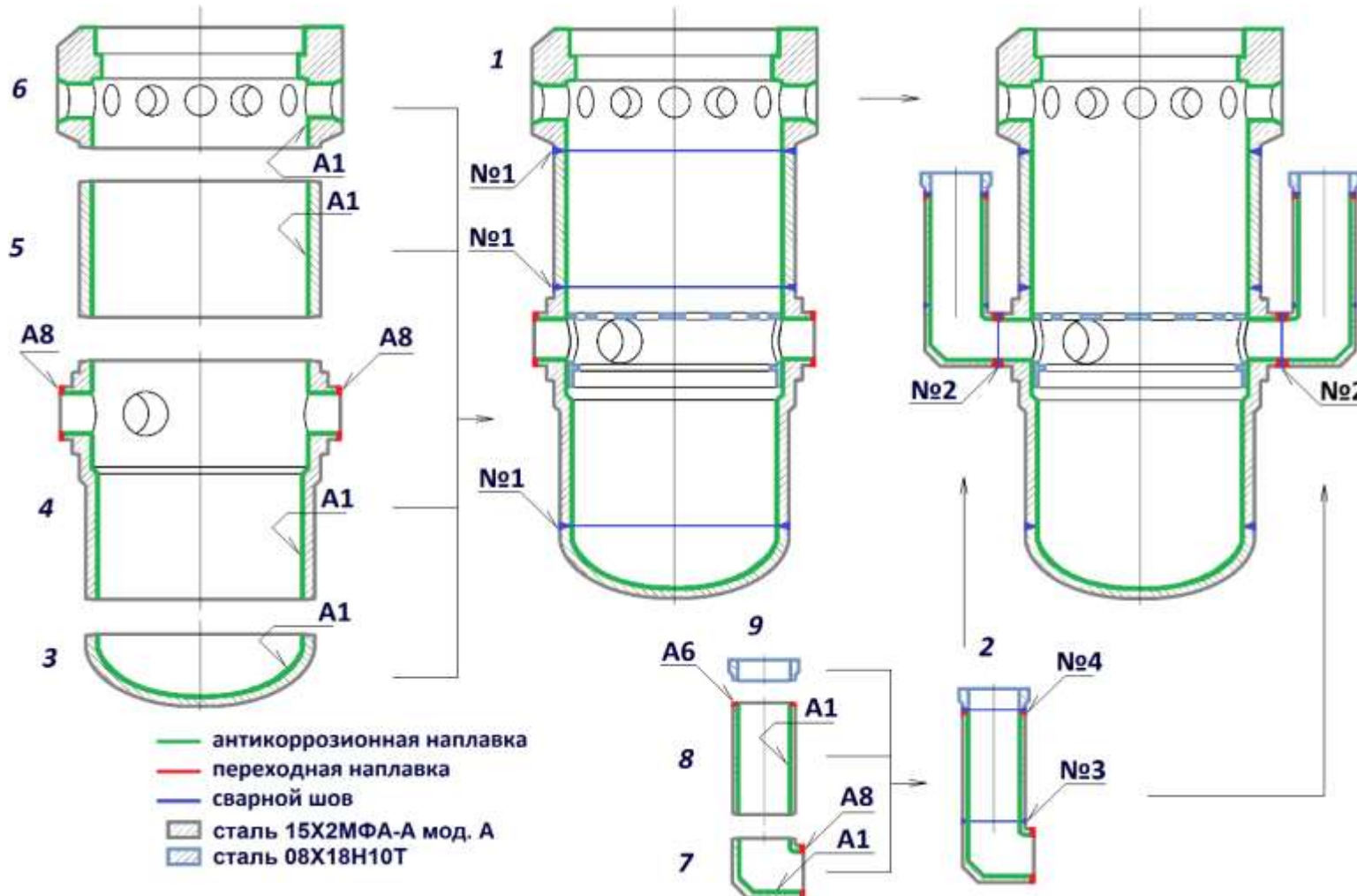


**МПЭБ Баимского ГОКа**



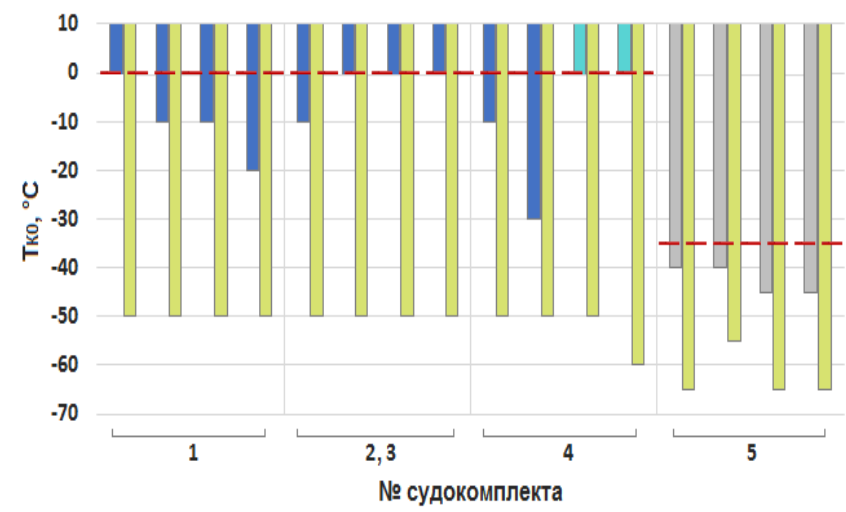
**АЭС малой мощности**





1 - корпуса реактора; 2 - корпус гидрокамеры; 3 – днище; 4 - обечайки с патрубками; 5 – обечайка;  
6 – фланец; 7 – угольник; 8 – обечайка гидрокамеры; 9 – фланец гидрокамеры

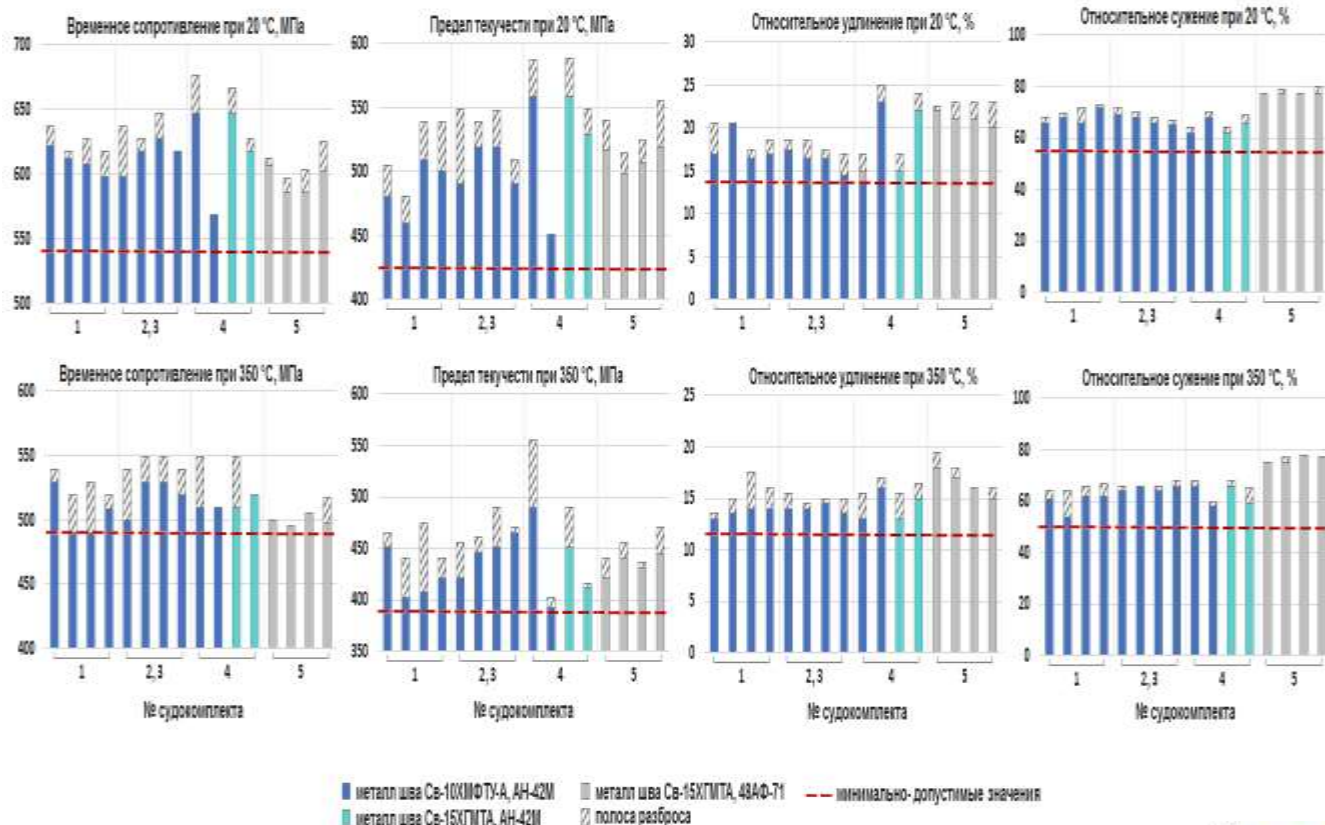
**Критическая температура хрупкости металла сварных швов стали 15X2MФА № 1 и №3, выполненных автоматической сваркой под флюсом**



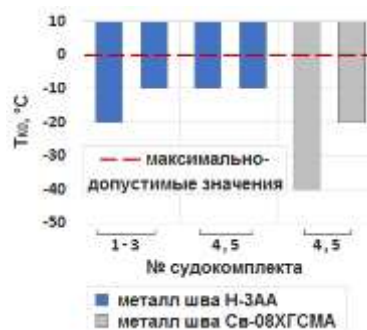
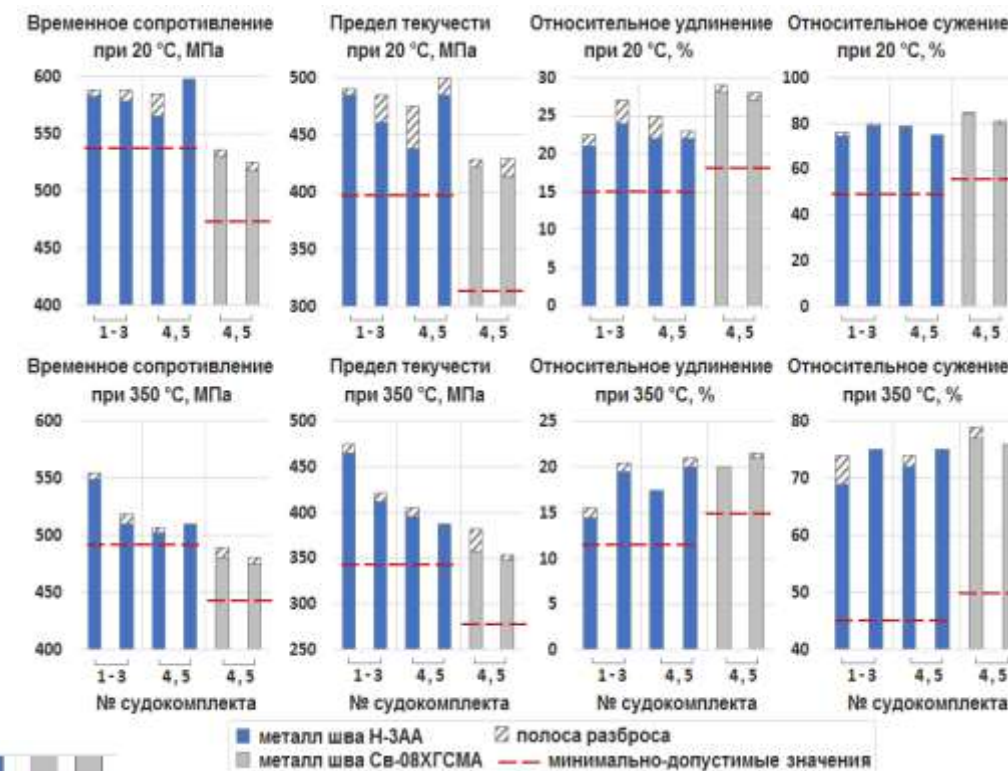
■ металл шва Св-10XMФТУ-А, АН-42М    ■ металл шва Св-15XГМТА, 48АФ-71  
■ металл шва Св-15XГМТА, АН-42М    ■ ЗТВ  
— — — максимально-допустимые значения

**Замена материалов для автоматической сварки под флюсом заготовок из стали 15X2MФА-А мод. А позволила снизить критическую температуру хрупкости металла шва до уровня требований к основному металлу**

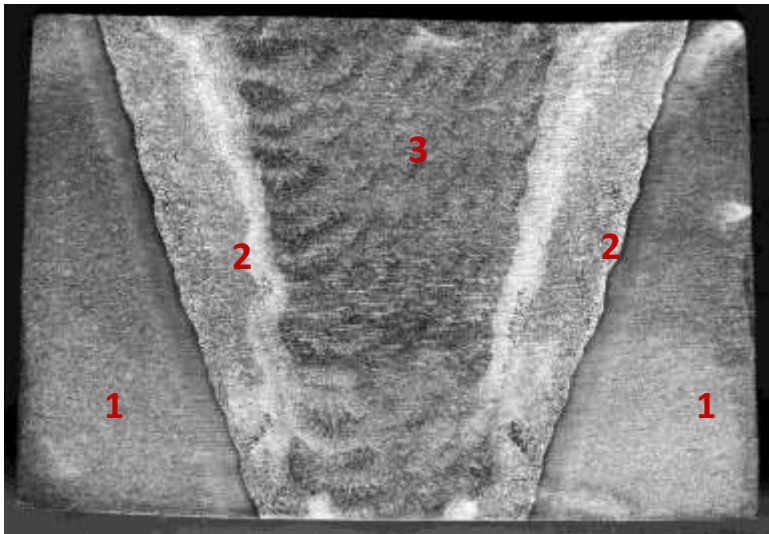
## Внедрение аргодуговой сварки взамен ручной дуговой



При замене материалов для автоматической сварки под флюсом стали 15Х2МФА-А мод. А обеспечиваются требования к механическим свойствам категории прочности КР45

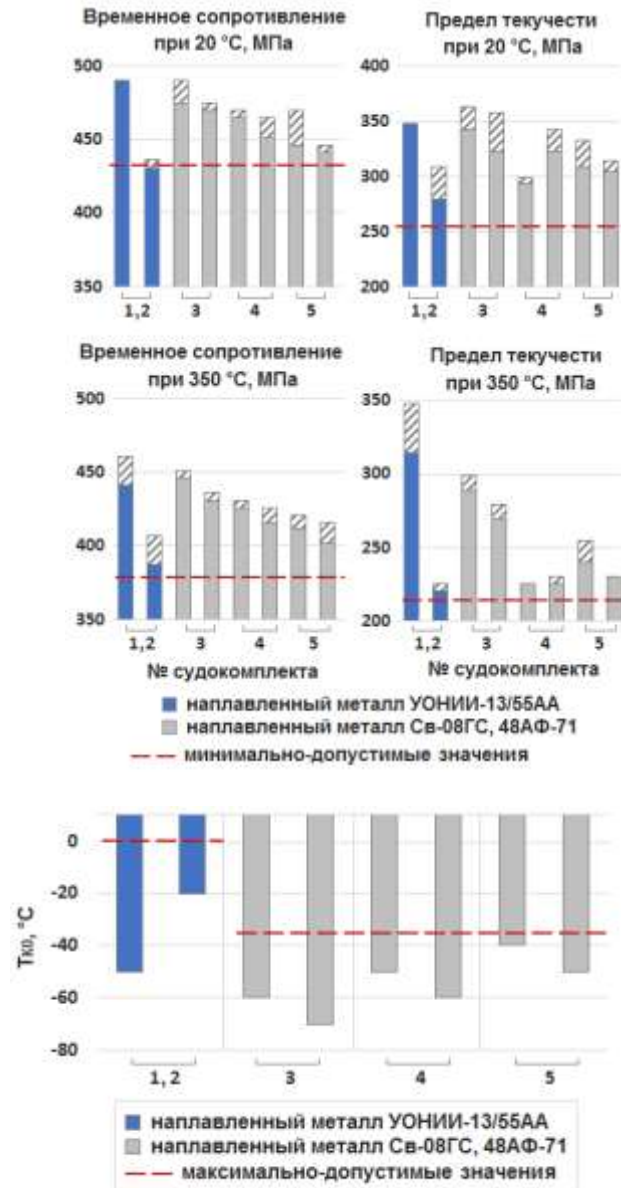


Замена РДС электродами Н-3АА при выполнении корня шва на АрДС привела к снижению уровня дефектности при выполнении сварных соединений приварки патрубков малого диаметра с 17% до 1% от общего числа рентген-снимков



1. Сталь 15Х2МФА-А мод. А
2. Наплавка А8
3. Сварной шов №2

Применение автоматической наплавки проволокой Св-08ГС под флюсом 48АФ-71 взамен ручной дуговой позволило повысить стойкость к хрупкому разрушению до уровня требований к заготовкам основного металла, при этом трудоемкость выполнения наплавки А8 снизилась с **5760** до **800** нормочасов на один судокорпус



1. За период строительства оборудования РУ РИТМ-200 проведен большой комплекс мероприятий, направленных на превышение производительности операций сварки и наплавки одновременно с повышением механических свойств металла шва.
2. Эволюция материалов для автоматической сварки позволила обеспечить сопротивление хрупкому разрушению на уровне требований к заготовкам основного металла – стали 15Х2МФА-А мод. А.
3. Применяемые при изготовлении судовых РУ РИТМ-200 основные и сварочные материалы полностью унифицированы с материалами, допущенными Федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии.
4. Сварное соединение приварки корпусов гидрокамер к корпусу реактора через переходные наплавки не имеет аналога конструктивно-технологического исполнения при изготовлении стационарных АЭС. Предложено провести необходимые аттестационные испытания в сокращенном объеме в обоснование технического проекта АСММ на базе реактора РИТМ-200Н.



## 08X18H10T

- Масса оборудования в установке РИТМ-200 превышает 200 т (компенсатор давления, гидроаккумулятор, емкость гидроаккумулятора, емкость запаса воды, теплообменник, фильтр)

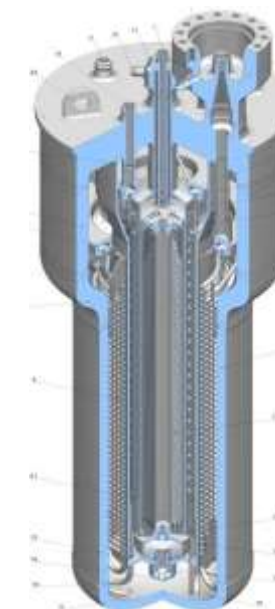
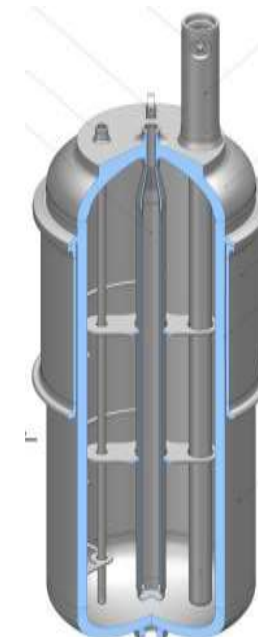
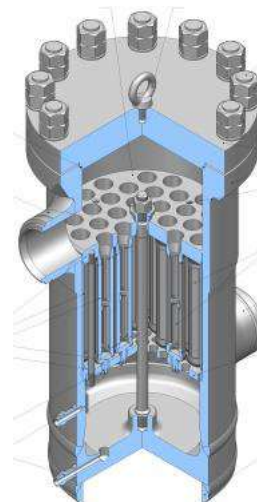
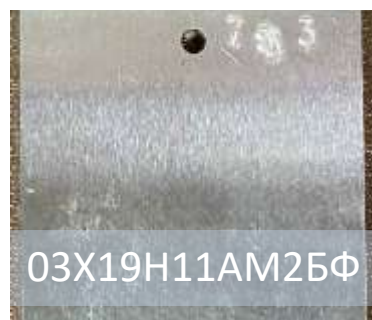
## 03X19H11AM2БФ

- Снижение металлоемкости оборудования РУ на величину до 25 %

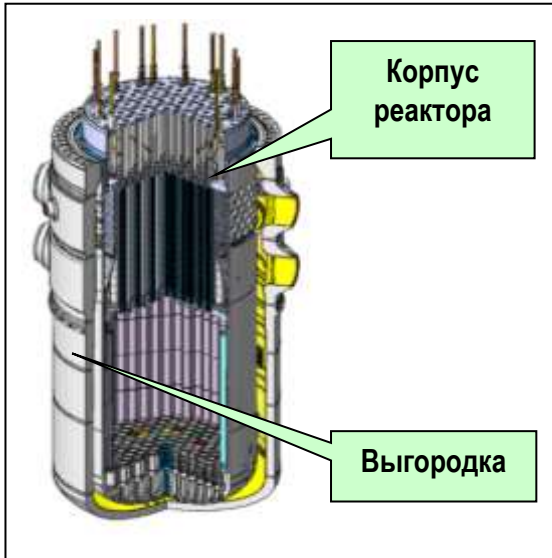
Повышение  
коррозионной  
стойкости

Улучшение  
показателей  
свариваемости

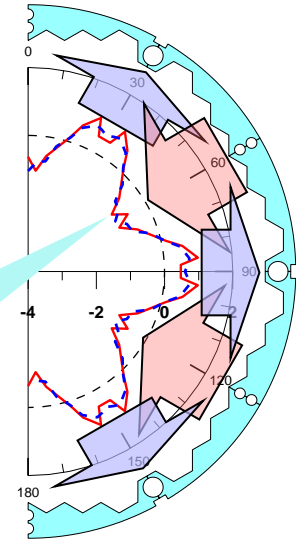
Повышение  
прочности на 25%



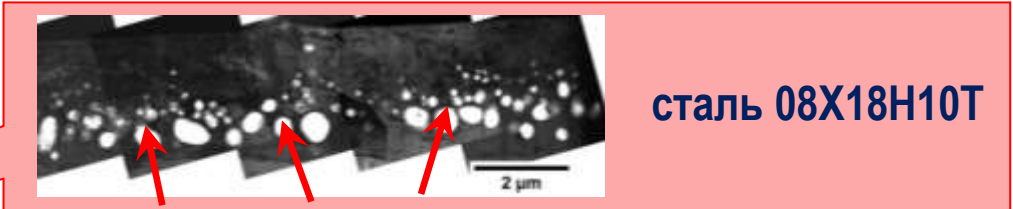
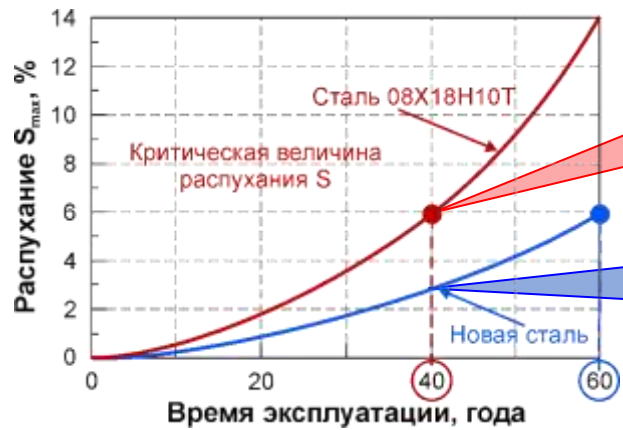
**Реактор ВВЭР**



Выгородка реактора ВВЭР.  
Нейтронная доза для  
выгородки в 1000 раз выше,  
чем для корпуса

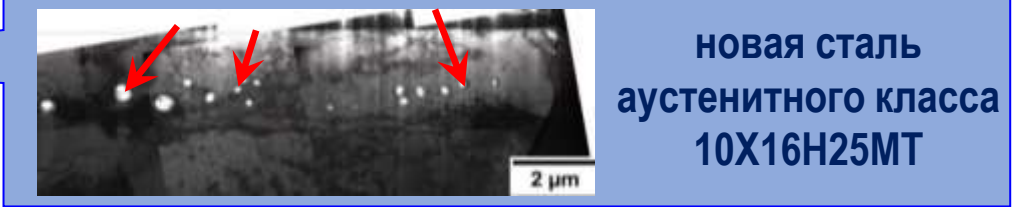


Изменение зазора  
между выгородкой  
и топливной сборкой, мм



**сталь 08X18H10T**

Вакансионная пористость, приводящая к распуханию



**новая сталь  
аустенитного класса  
10X16H25MT**

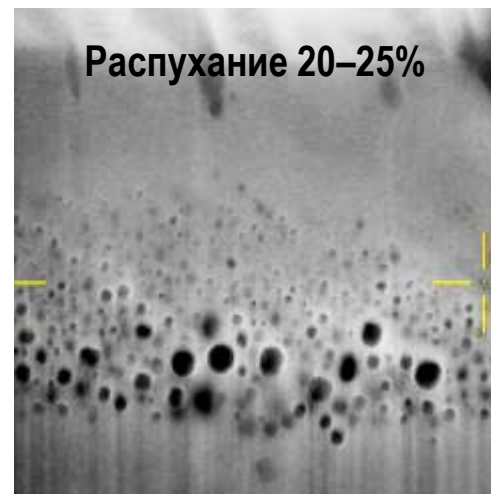
**ОБЕСПЕЧЕНА БЕЗОПАСНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ АТОМНЫХ УСТАНОВОК ДО 40 ЛЕТ**

Разработанная НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» новая радиационностойкая сталь X16H25MT для ВКУ ВВЭР-ТОИ позволит гарантированно обеспечить проектный ресурс выгордки реактора в условиях повышенных нейтронных нагрузок (до доз 160 сна).

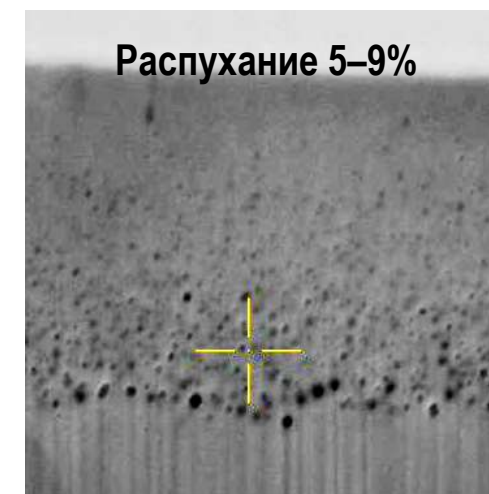
Радиационная стойкость новой стали обоснована на базе исследований материала после ионного облучения до максимальной дозы свыше 200 сна.



**X18H10T**



**X16H25M2T**

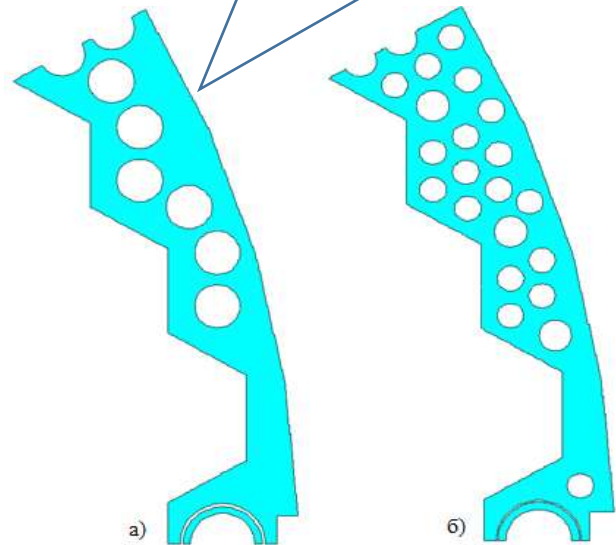


Результаты исследований после ионного облучения

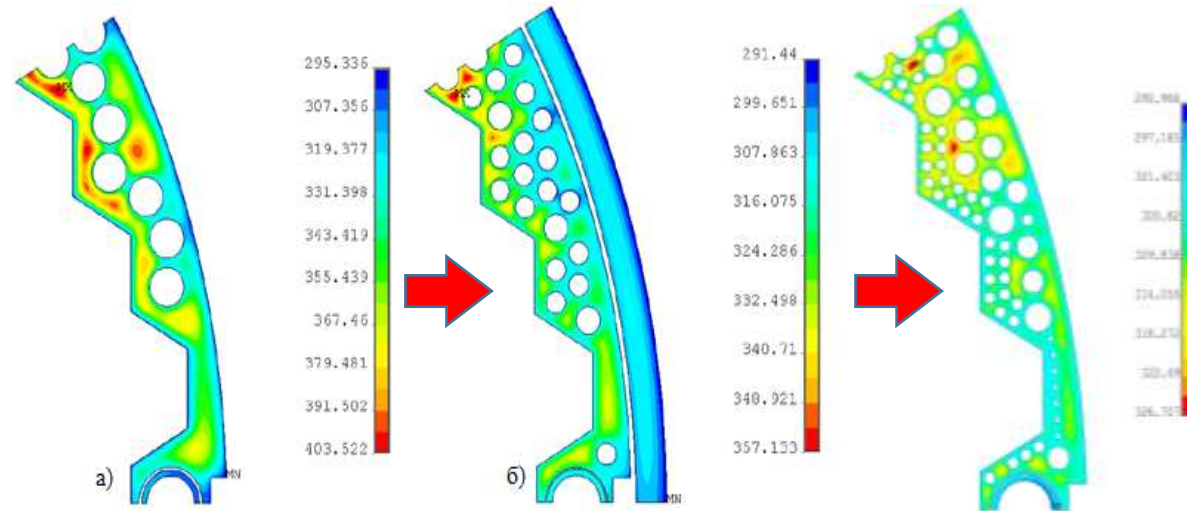
В настоящий момент разработана принципиальная технологияковки и изготовлена опытно-промышленная поковка заготовки кольца выгордки из стали X16H25MT удовлетворяющая требованиям ТУ 24.10.22-201-07516250-2018.

Для верификации физико-механических свойств проводится нейтронное облучение новой стали в исследовательских реакторах

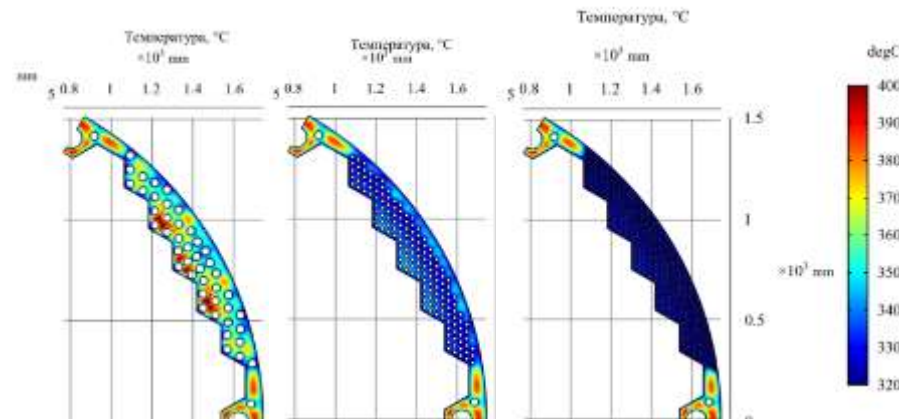
**Выгородка защищает корпус реактора от радиационного разогрева**



Применяемые варианты  
расположения каналов охлаждения  
в настоящее время



При уменьшении  
диаметра каналов и  
увеличении их  
количества  
максимальная  
температура  
выгородки  
уменьшается с 400 °C  
до 320 °C



Распределение тепловых  
полей в выгородке с  
различным диаметром  
отверстий

**Задача конструктора - уменьшить радиационный разогрев.  
Каналы диаметром менее 40 мм просверлить технологически невозможно.  
Выход есть в АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ.**

## Классическая технология



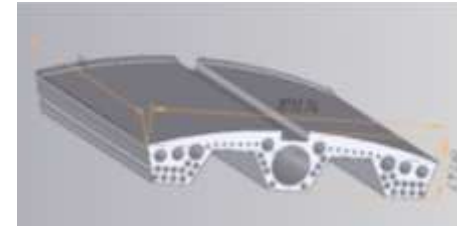
- 1. Изготовление заготовки кольца :**
- отливка;
  - прошивка (удаление средней части) на раздаточном стане;
  - раздача слитка для формирования кольца с промежуточными деформационной и термической обработкой;
  - механическая обработка.
- Масса заготовки – 30 т**



- 2. Механическая обработка:**
- формирование внутреннего профиля;
  - сверление каналов охлаждения диаметром не менее 40 мм.
- Масса готового кольца – 9 т**

**Удаляется более 75% дорогостоящего металла из заготовки.**  
**Нет возможности уменьшить диаметр каналов охлаждения.**

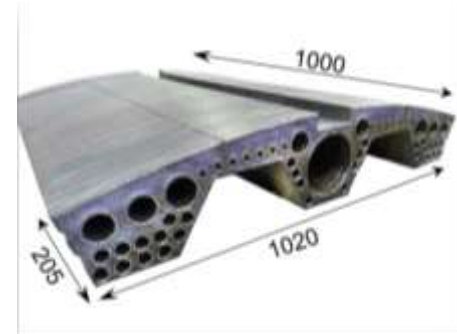
## Аддитивная технология



- 1. Разработка CAD модели.**



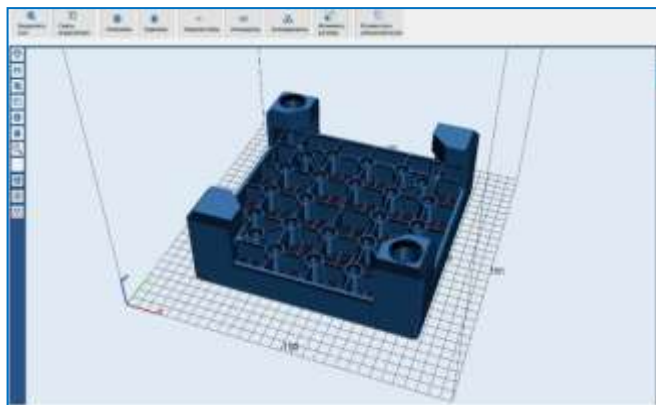
- 2. Прямое лазерное выращивание (ПЛВ) по CAD модели.**
- профиль формируется в процессе выращивания;
  - каналы охлаждения формируются в процессе выращивания;
  - синхронная работа двух наплавочных робота.



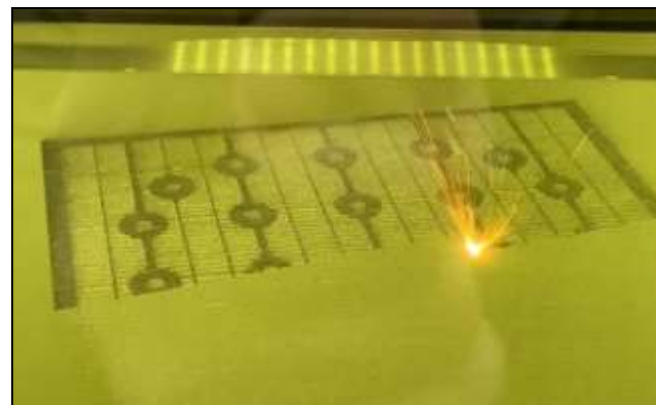
**Изделие выращивается заданного размера.**  
**Каналы охлаждения могут быть диаметром 10 мм и менее.**

**Таким образом, аддитивное изготовление позволяет уменьшить количество отходов и придать новые свойства изделию.**

Антидебризный фильтр защищает пространство между трубками ТВЭЛов от попадания инородных включений и служит одним из конструктивных элементов ТВС



**CAD модель**



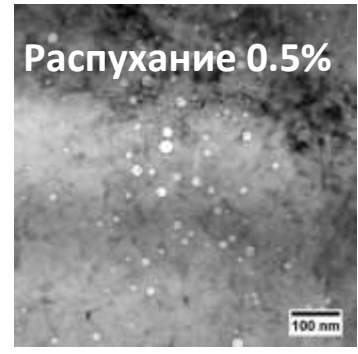
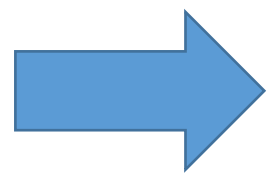
**Печать методом СЛС**



**Готовое изделие**

Разрабатывается в рамках Единого отраслевого тематического плана Госкорпорации «Росатом»

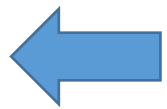
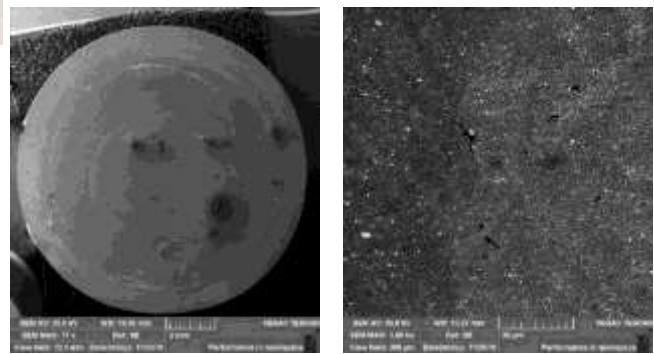
Сталь не подвержена радиационному набуханию в условиях эксплуатации ВКУ реактора ВВЭР-СКД: При дозе 200 сна распухание не превышает 0,5%.



Автоклавные испытания в воде со сверхкритическими параметрами (P=250 атм, T=550°C) показали высокое сопротивление коррозионному растрескиванию стали как в исходном состоянии, так и после ионного облучения



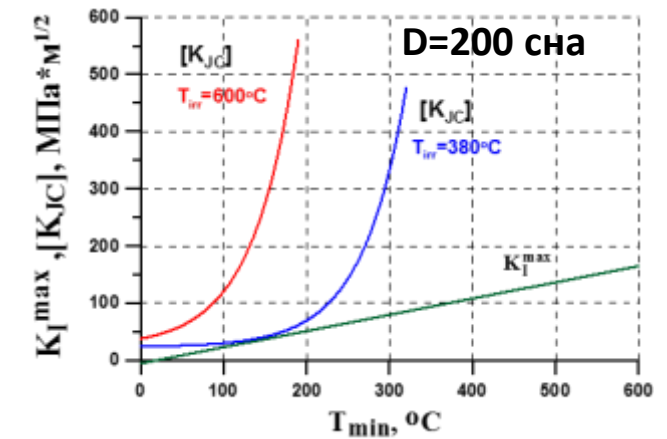
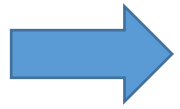
После ионного облучения до 200 сна



Пластичность материала

В воде	На воздухе
70–80%	73–82%

Сталь обладает достаточным сопротивлением хрупкому разрушению при температурах эксплуатации ВКУ ВВЭР-СКД 400–550°C, что обеспечивает целостность конструкции ВКУ даже при жестком аварийном расхолаживании



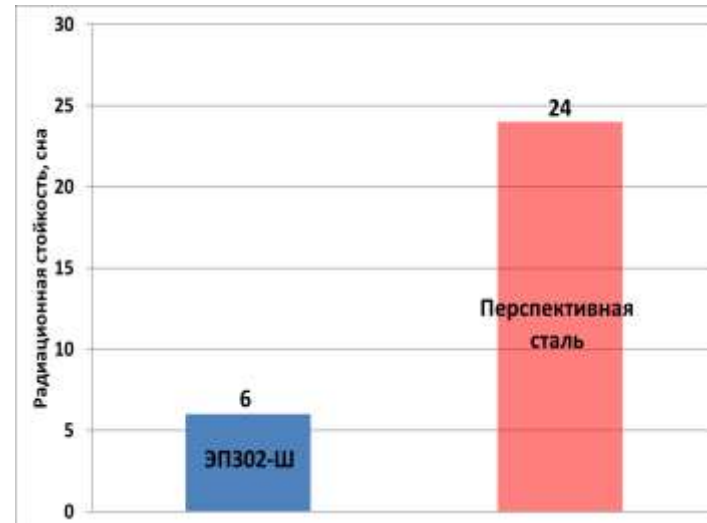
## АПЛ с реакторной установкой с жидкометаллическим теплоносителем (пр.705 Лира)



На основании опыта эксплуатации и экспериментальных исследований разработана новая марка стали для перспективных РУ с теплоносителем Pb–Bi 04X15H11C3MT.

Перспективная сталь обладает:

- повышенной технологичностью (не образует деформационного мартенсита и не требует термообработки после технологических операций);
- в шесть раз более высокой радиационной стойкостью (по критерию достижения пластичности в 2%);
- высокой структурной стабильностью (не охрупчивается при тепловом старении);
- при создании стали учтен опыт эксплуатации РУ ОК550 (705пр.).



Экспериментальное исследование конструкционных материалов в неизотермическом стенде.

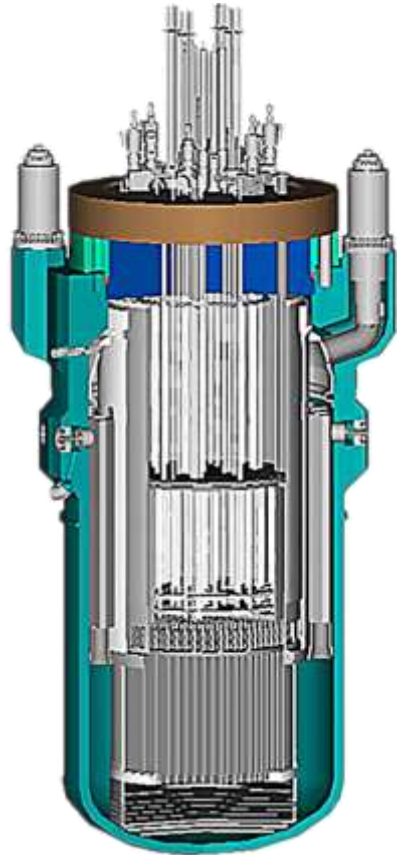


*Перспективная аустенитная* сталь принята в качестве основного конструкционного материала для транспортной РУ заказ зав. № 01401.



## ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ ДЛЯ КОРПУСА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Комплектность ЯЭУ из титана: корпус, парогенератор, турбина, конденсатор



Транспортный реактор интегрального типа для перспективных ЯЭУ

Основные требования к титановому сплаву:

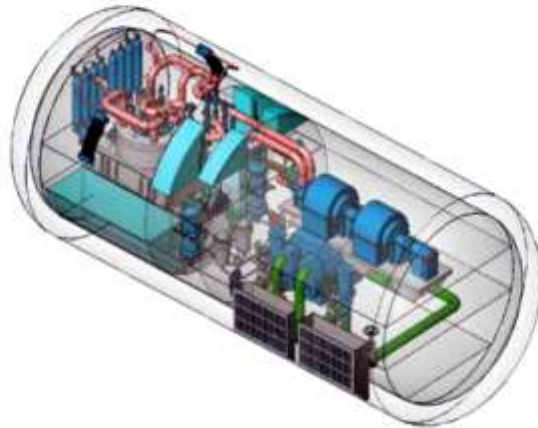
- ✓ Предел прочности  $\sigma_b \geq 540$  МПа при  $T=350^\circ\text{C}$
- ✓ Предел текучести  $\sigma_{0,2} \geq 450$  МПа при  $T=350^\circ\text{C}$
- ✓ Пластичность  $\delta \geq 12\%$  при  $T=350^\circ\text{C}$
- ✓ Длительная прочность  $\geq 300$  МПа при  $T=350^\circ\text{C}$
- ✓ Высокая коррозионная стойкость в среде первого контура
- ✓ Радиационная стойкость при  $T_{\text{обл.}}$  до  $F=3 \times 10^{20}$  н/см<sup>2</sup>

Технические преимущества реактора из титанового сплава:

- Возможность монтажа энергоблока в виде модуля полной заводской готовности с использованием на 90% электронно-лучевой сварки.
- Снижение массогабаритных характеристик энергоблока в 1,5–2 раза.
- Отсутствие патрубков и трубопроводов большого диаметра, что снижает вероятность течи теплоносителя.
- Отсутствие разнородных материалов в активной зоне.
- Отсутствие антикоррозионного покрытия внутренней поверхности корпуса.
- Обеспечение предельного флюенса  $\Phi=3 \times 10^{20}$  н/см<sup>2</sup> на внутреннюю стенку корпуса со сроком службы 40 лет.

## Корпус атомного реактора интегрального типа малой мощности

Создание совместно с ОАО «ВСМПО-АВИСМА» малоактивируемого радиационнстойкого титанового сплава композиции Ti-Al-V-Zr на основе высокочистого губчатого титана по примесям: Fe ≤ 0,01; Ni ≤ 0,001; Co ≤ 0,0001; O ≤ 0,017; H ≤ 0,002; C ≤ 0,08; Cu ≤ 0,001; N ≤ 0,005



Концептуальный облик энергетического модуля подводного (подледного) комплекса

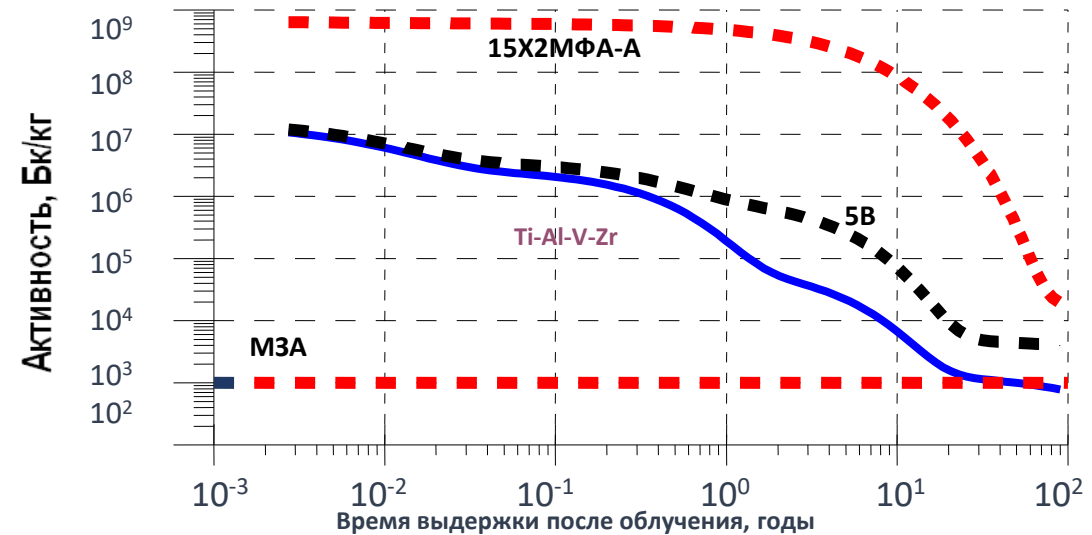
с атомным реактором интегрального типа из титанового сплава

Фактические свойства сплава Ti-Al-V-Zr :

$$\sigma_{02}^{20} = 780 \text{ МПа}; \quad \sigma_{\epsilon}^{20} = 900 \text{ МПа}; \quad \varphi^{20} = 39\%; \quad \delta^{20} = 14\%; \quad KCV^{20} = 680 \text{ кДж} / \text{м}^2$$

$$\sigma_{02}^{350} = 490 \text{ МПа}; \quad \sigma_{\epsilon}^{350} = 550 \text{ МПа}; \quad \varphi^{350} = 58\%; \quad \delta^{350} = 18\%$$

Расчетное время спада наведённой активности.  
Условия облучения:  $\Phi = 1 + 1,5 \times 10^{20}$  нейтр./см<sup>2</sup> (E = 0,5 МэВ)



Расчетный срок спада наведённой активности до М3А:  
для сплава Ti-Al-V-Zr – 31 год, для 15X2MФА > 150 лет.

Повторное безопасное использование титанового сплава – через 30 лет

НИЦ «Курчатowski институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» вместе с промышленными предприятиями страны прошел большой путь по совершенствованию технологии изготовления корпусов атомных реакторов от первых слитков массой до 140т для корпусов первых транспортных реакторов до слитка массой 420т (Ø5м, Н5,5м) ( для корпуса реактора курской АЭС ВВЭР ТОИ, освоенного на ОМЗ «Спецсталь» и на ПАО «Энергомашспецсталь» (Кроматорск, Украина).

Россия является единственной страной, обладающей не только военным, но и гражданским атомным флотом. Ледоколы с атомными энергетическими установками (АЭУ) уже более полувека успешно обеспечивают надёжную и безопасную проводку транспортных судов на всех участках Северного морского пути.

Разработанные в НИЦ «Курчатowski институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» основные и сварочные материалы обеспечили проектирование и строительство АЭУ на базе ВВЭР для новых двухосадочных атомных ледоколов (проект РИТМ-200, реактор интегрального типа). Впервые для изготовления КР интегрального типа применена сталь марки 15Х2МФА-А мод. А, обладающая непревзойденной радиационной стойкостью и стойкостью против теплового охрупчивания. Это обеспечивает сверхдлительный ресурс работы и абсолютную безопасность при эксплуатации ледокольной АЭУ в течение всего срока службы.

В настоящее время, закончены работы по серийному производству крупногабаритных заготовок КР РИТМ-200 для ледоколов «Сибирь», «Урал» и «Арктика»

Учитывая опыт взаимодействия при создании судов и ледоколов с новыми техническими характеристиками, АО «ОКБМ Африкантов» совместно с НИЦ «Курчатowski институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» начаты работы по созданию усовершенствованной РУ РИТМ-400 атомного ледокола-лидера для круглогодичной работы по проводке судов на Северном морском пути.

