

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

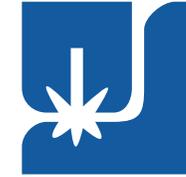


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

«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

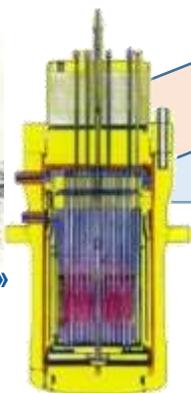


25Х3МФ(48ТС)

Петлевая компоновка ВМ-1

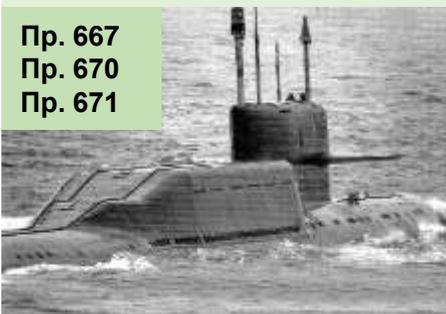


АПЛ «Ленинский комсомол»
Корпус: 38Х3НМФА
Крышка: (48ТС)



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

Ресурс более 60 лет

Водо-водяные реакторы

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



Петлевая компоновка ОК-550

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

IV поколение

Пр. 955 «Борей»
Пр. 885 «Ясень»

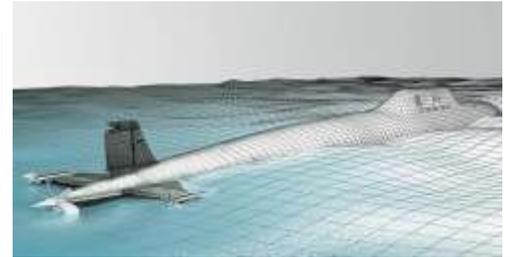


15Х2МФА-А Модификация А и Б

Интегральная компоновка Митра-А КТП-6

Заказ перспективной лодки

Перспективная аустенитная сталь марки 04Х15Н11С3МТ



Интегральная компоновка

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 4×10^{20} нейтр/см². (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 4×10^{20} нейтр/см².

Максимальная толщина заготовок под термическую обработку – 670 мм.



Ледоколы проекта 22220

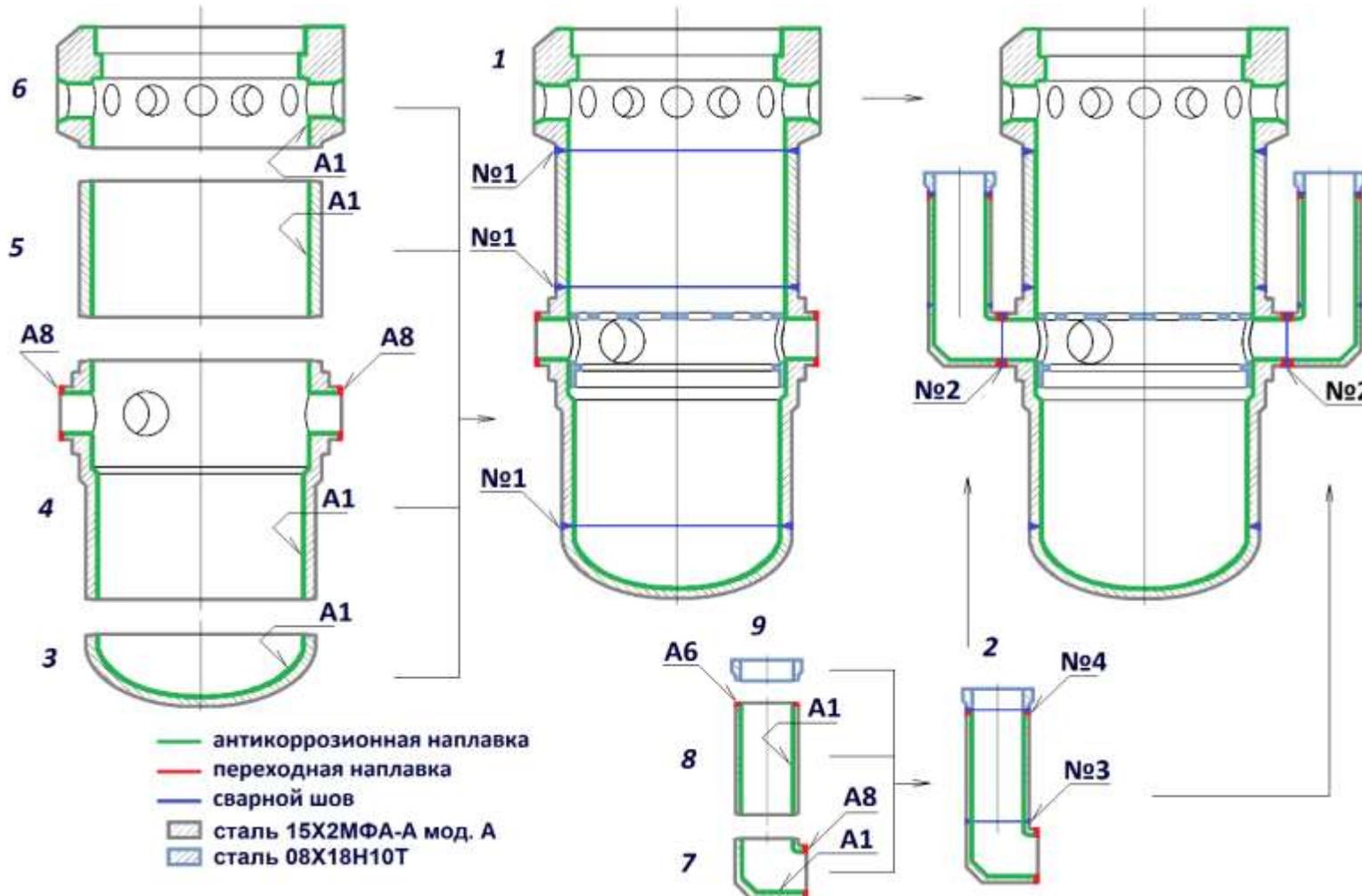


МПЭБ Баимского ГОКа



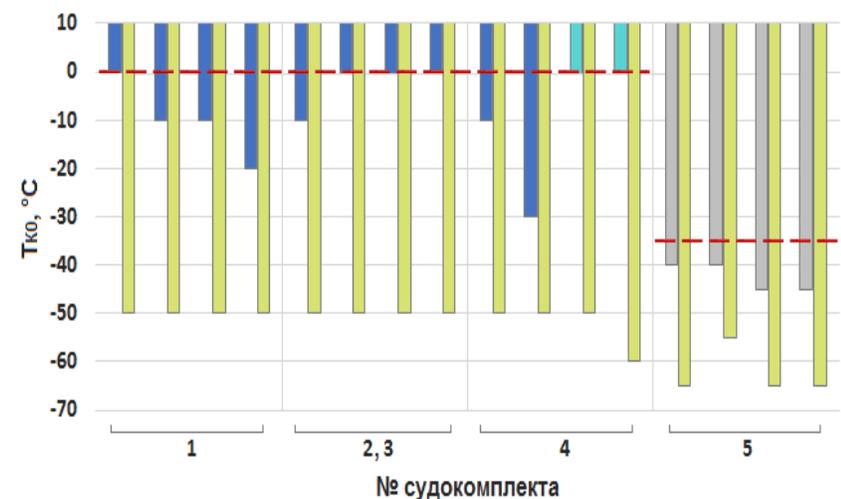
АЭС малой мощности





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

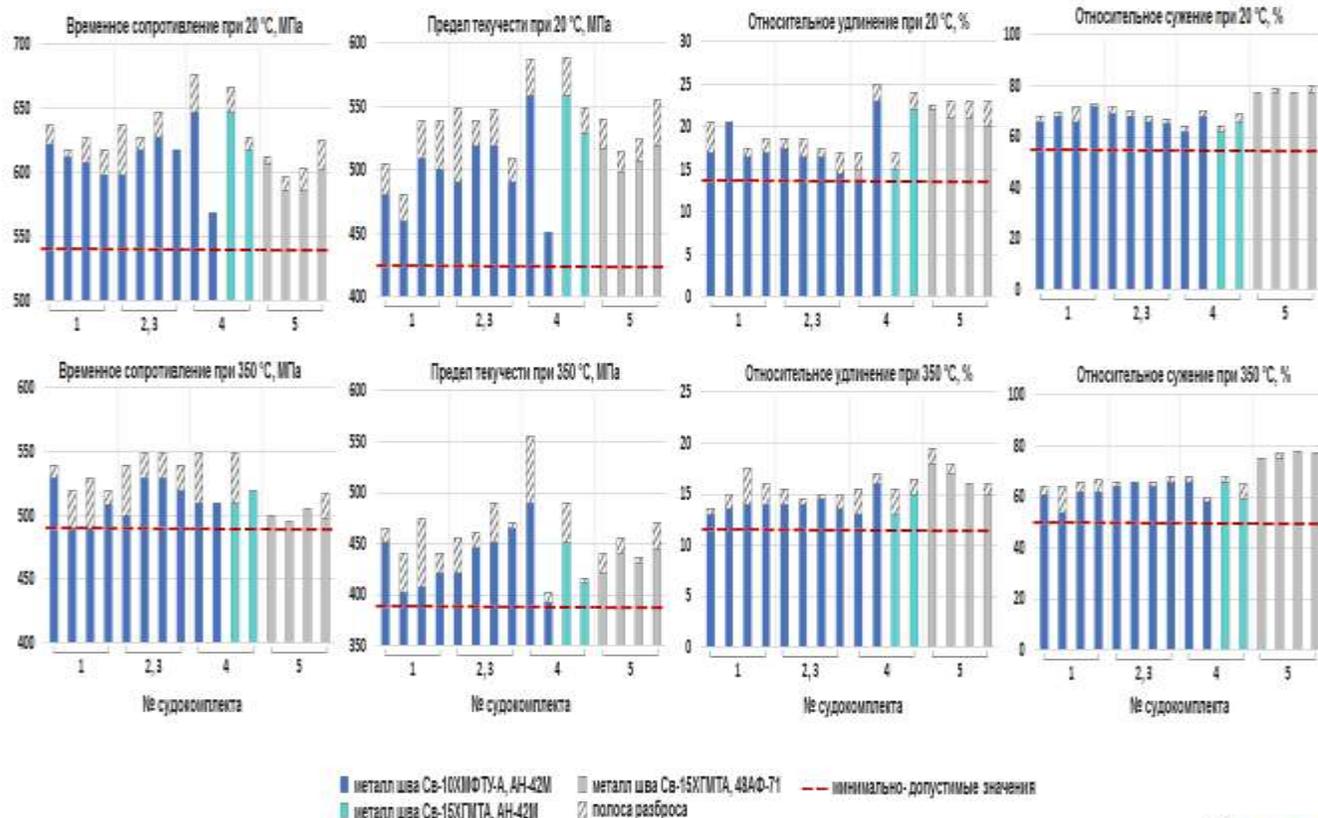
Критическая температура хрупкости металла сварных швов стали 15X2MФА № 1 и №3, выполненных автоматической сваркой под флюсом



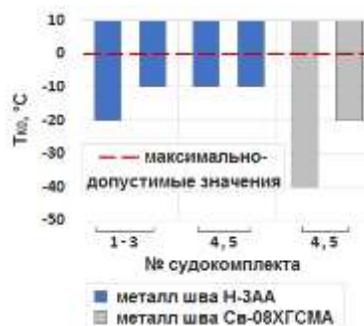
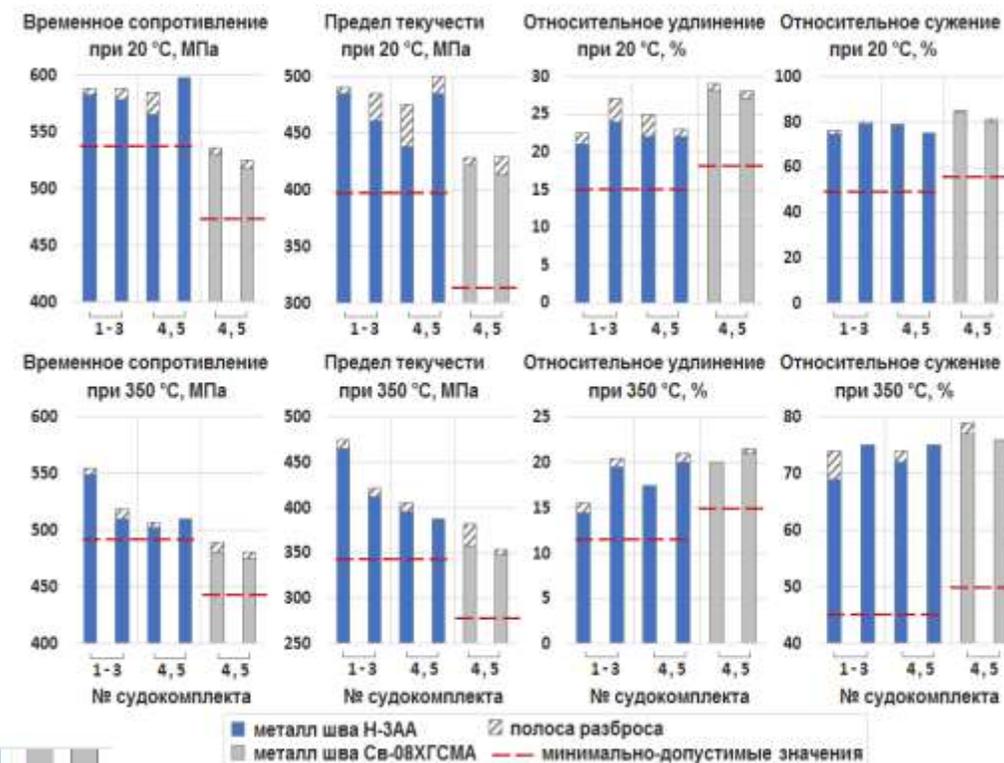
■ металл шва Sv-10XMФТУ-А, AN-42M ■ металл шва Sv-15XГМТА, 48АФ-71
■ металл шва Sv-15XГМТА, AN-42M ■ 3ТВ
— — — максимально-допустимые значения

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

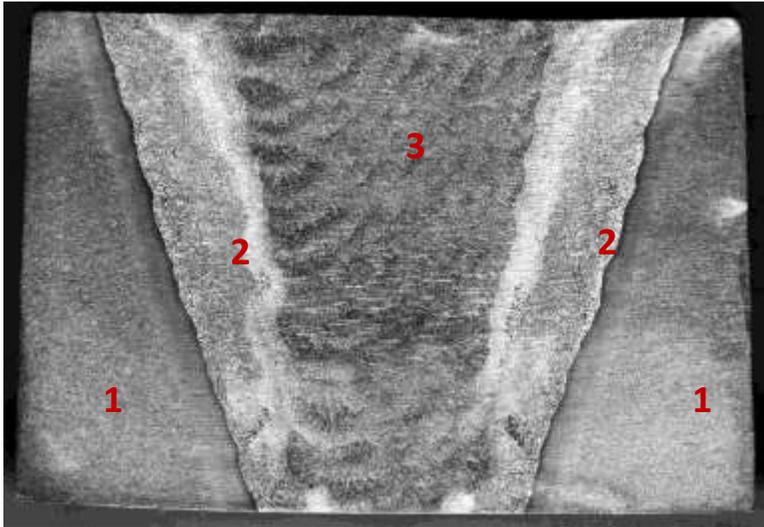
Внедрение аргодуговой сварки взамен ручной дуговой



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

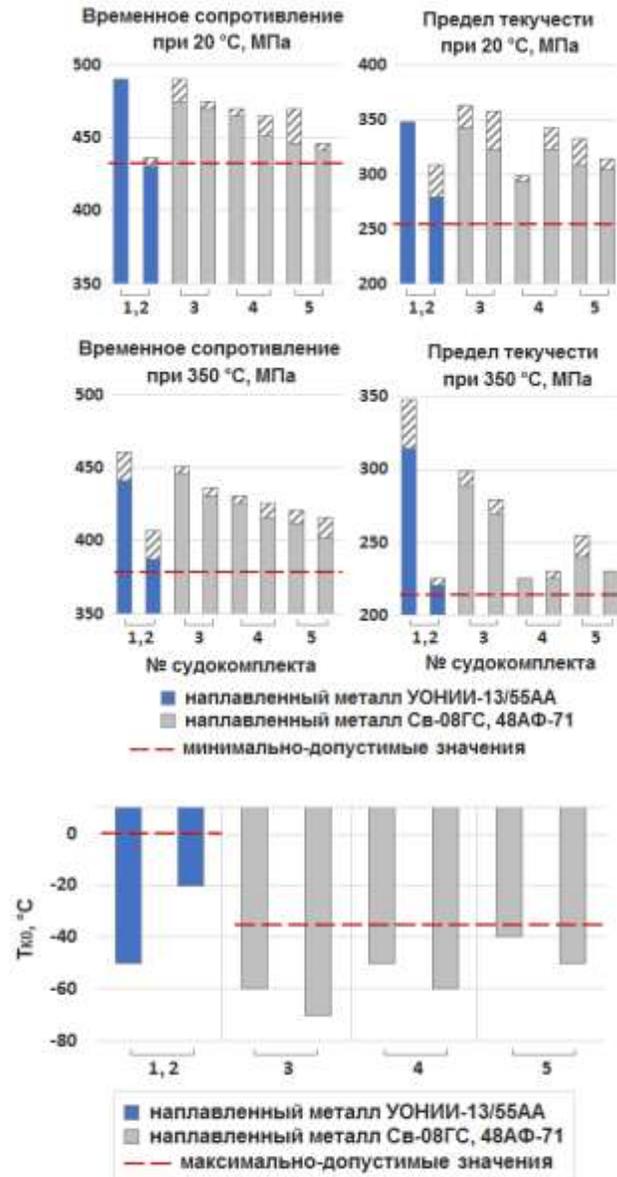


Замена РДС электродами Н-3АА при выполнении корня шва на АрДС привела к снижению уровня дефектности при выполнении сварных соединений приварки патрубков малого диаметра с 17% до 1% от общего числа рентген-снимков



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)

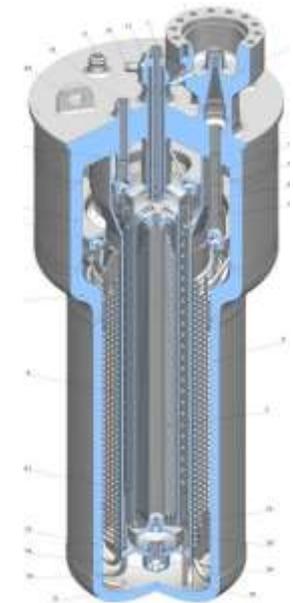
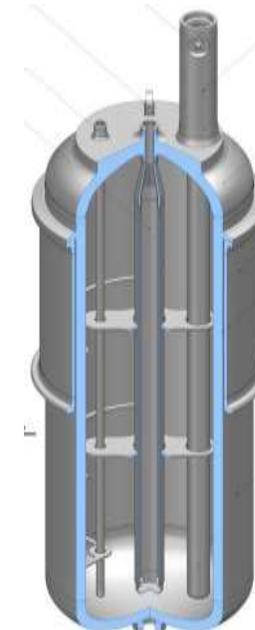
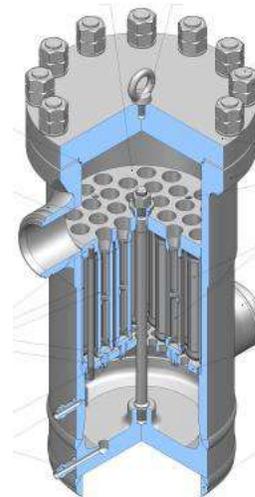
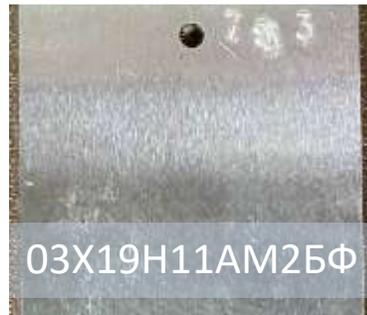
03X19H11AM2БФ

- Снижение металлоемкости оборудования РУ на величину до 25 %

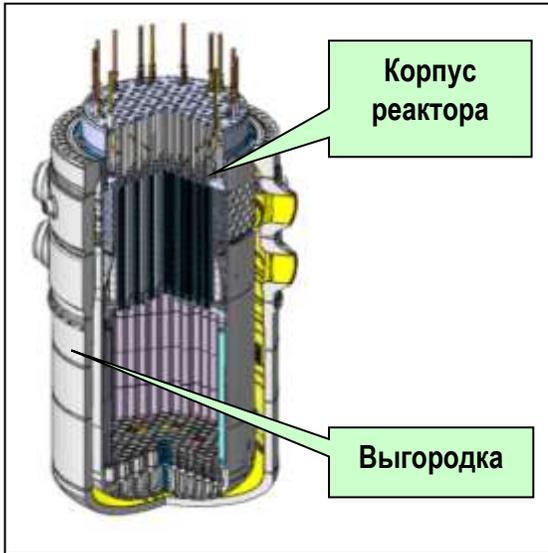
Повышение
коррозионной
стойкости

Улучшение
показателей
свариваемости

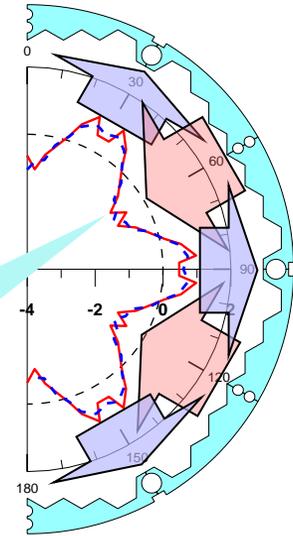
Повышение
прочности на 25%



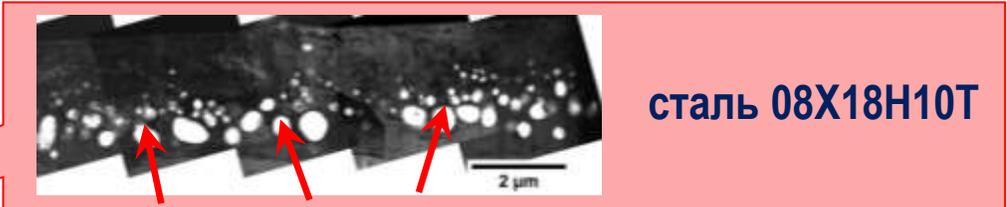
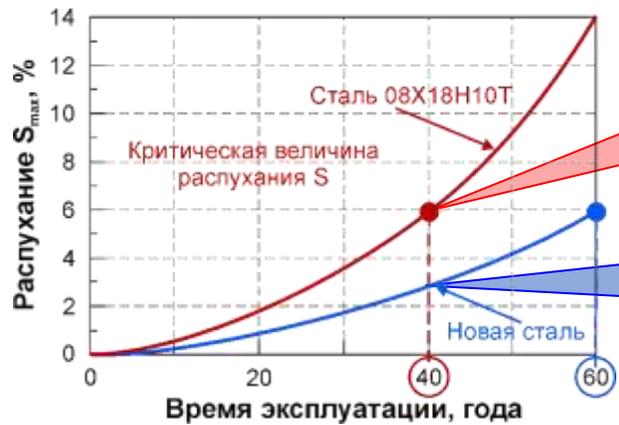
Реактор ВВЭР



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

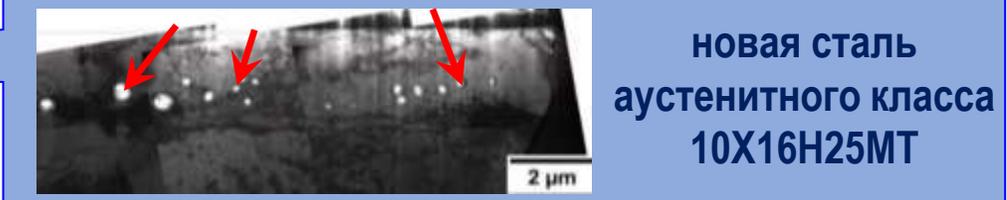


Изменение зазора
между выгородкой
и топливной сборкой, мм



сталь 08X18H10T

Вакансионная пористость, приводящая к распуханию



**новая сталь
аустенитного класса
10X16H25MT**

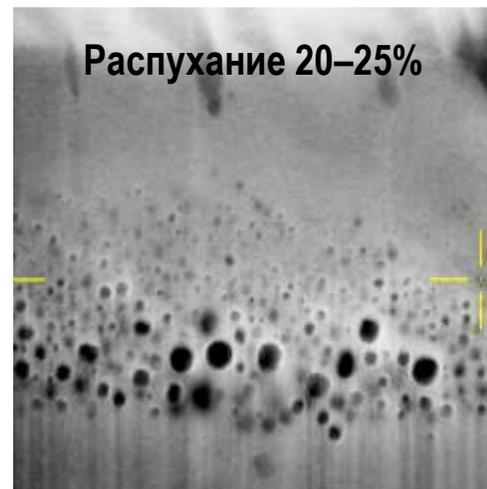
ОБЕСПЕЧЕНА БЕЗОПАСНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ АТОМНЫХ УСТАНОВОК ДО 40 ЛЕТ

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).

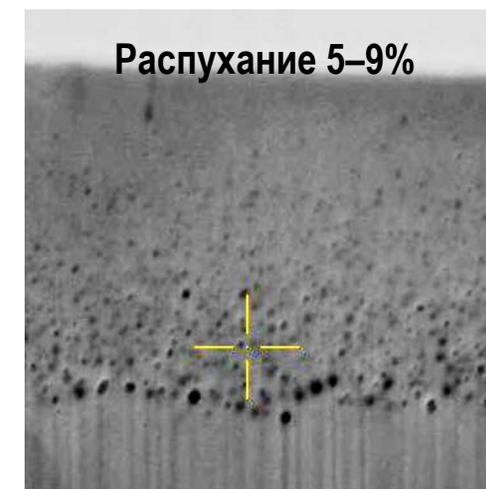
Радиационная стойкость новой стали обоснована на базе исследований материала после ионного облучения до максимальной дозы свыше 200 сна.



X18H10T



X16H25M2T

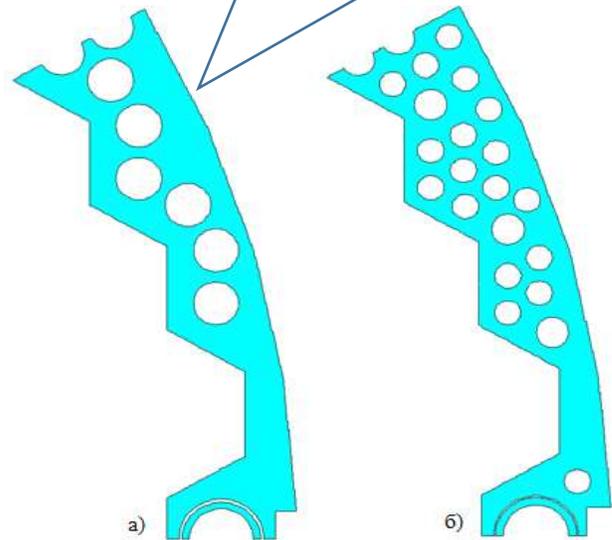


Результаты исследований после ионного облучения

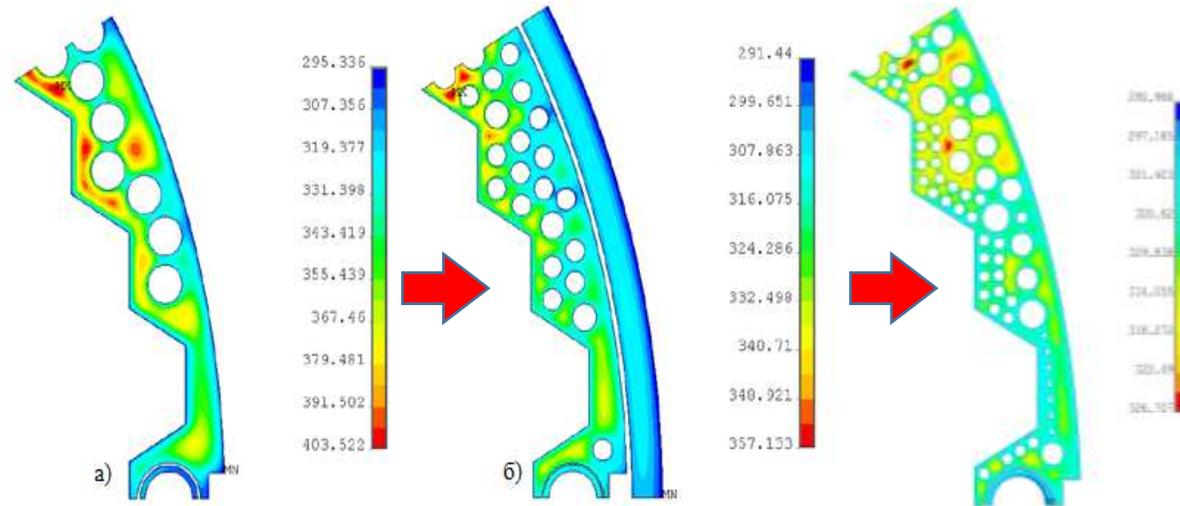
В настоящий момент разработана принципиальная технологияковки и изготовлена опытно-промышленная поковка заготовки кольца выгордки из стали X16H25MT удовлетворяющая требованиям ТУ 24.10.22-201-07516250-2018.

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

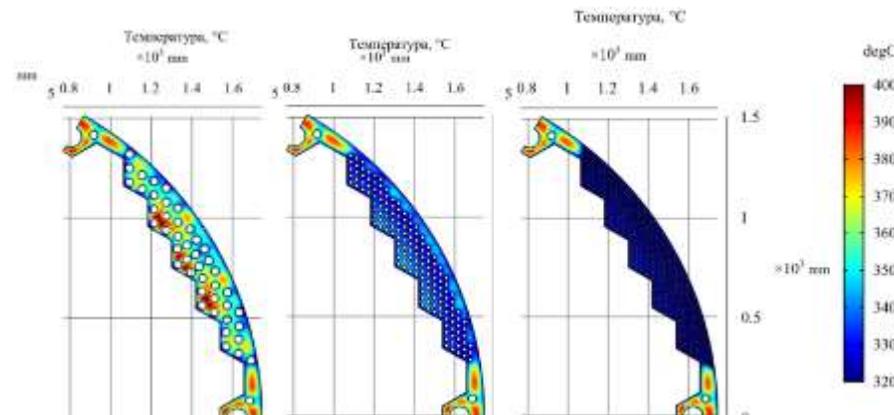
Выгородка защищает корпус реактора от радиационного разогрева



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



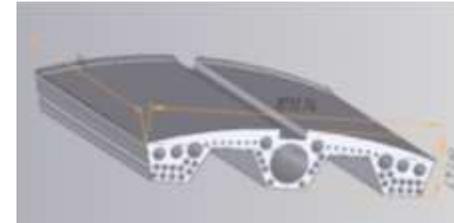
- 1. Изготовление заготовки кольца :**
- отливка;
 - прошивка (удаление средней части) на раздаточном стане;
 - раздача слитка для формирования кольца с промежуточными деформационной и термической обработкой;
 - механическая обработка.
- Масса заготовки – 30 т**



- 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.

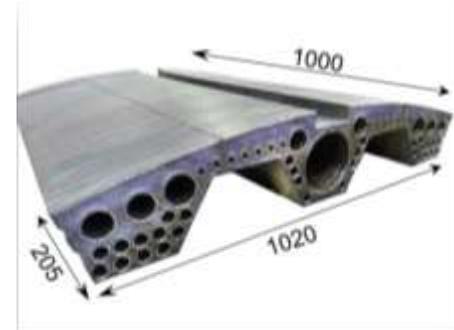
Аддитивная технология



- 1. Разработка CAD модели.**



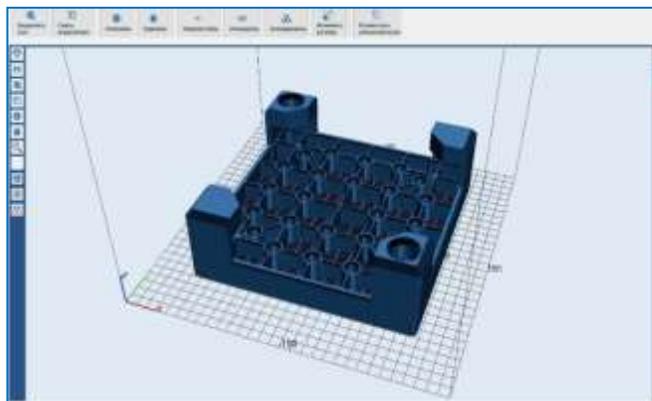
- 2. Прямое лазерное выращивание (ПЛВ) по CAD модели.**
- профиль формируется в процессе выращивания;
 - каналы охлаждения формируются в процессе выращивания;
 - синхронная работа двух наплавочных робота.



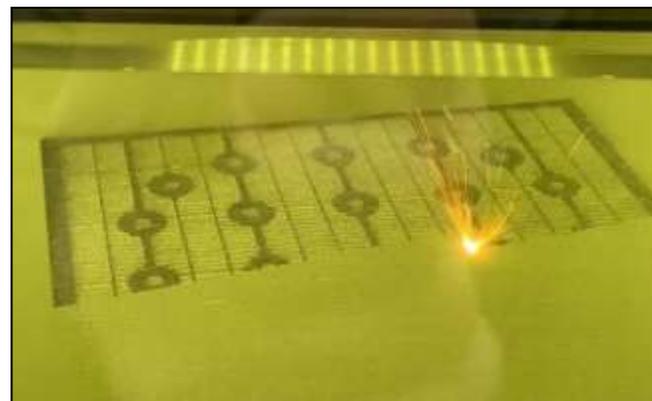
Изделие выращивается заданного размера.
Каналы охлаждения могут быть диаметром 10 мм и менее.

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



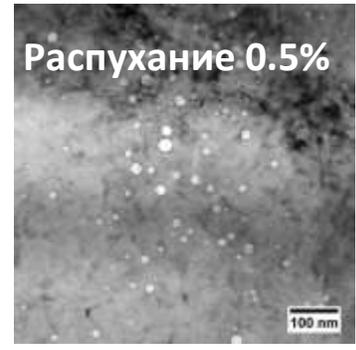
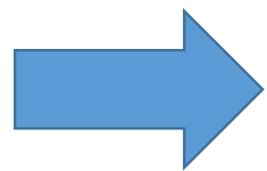
Печать методом СЛС



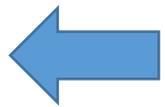
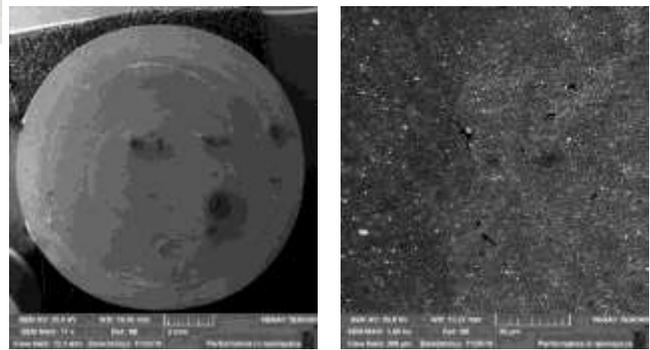
Готовое изделие

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%.



После ионного облучения до 200 сна

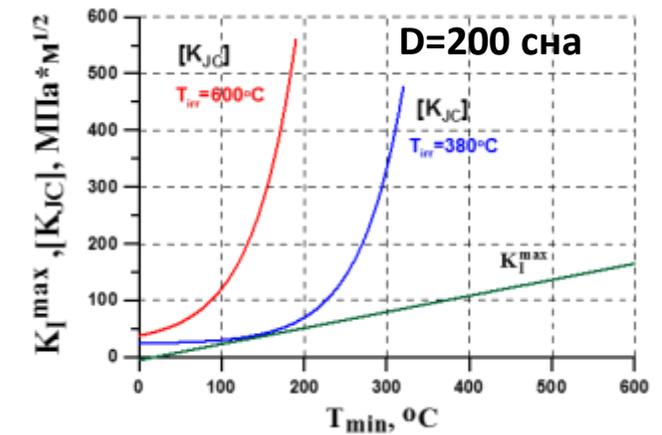
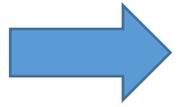


Автоклавные испытания в воде со сверхкритическими параметрами (P=250 атм, T=550°C) показали высокое сопротивление коррозионному растрескиванию стали как в исходном состоянии, так и после ионного облучения

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



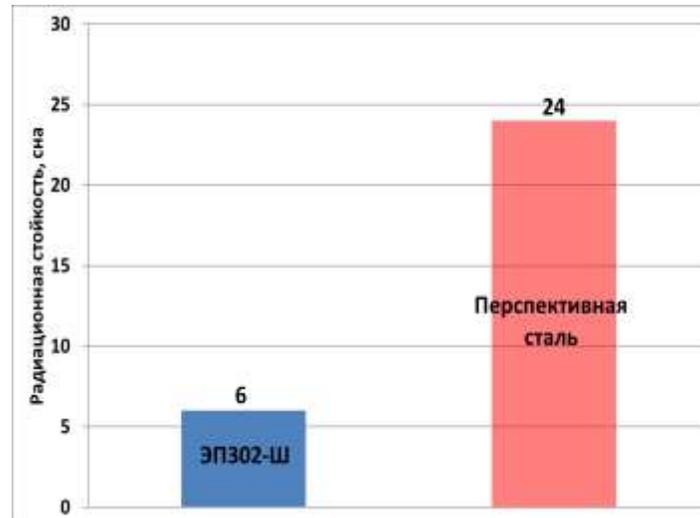
АПЛ с реакторной установкой с жидкометаллическим теплоносителем (пр.705 Лира)



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.).



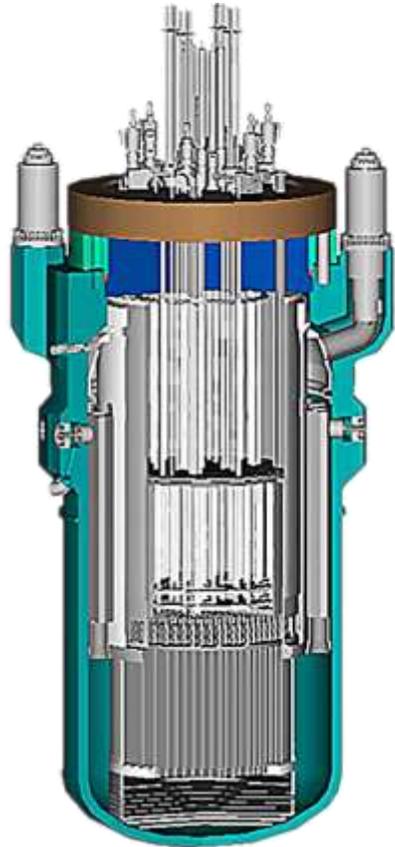
Экспериментальное исследование конструкционных материалов в неизотермическом стенде.



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:

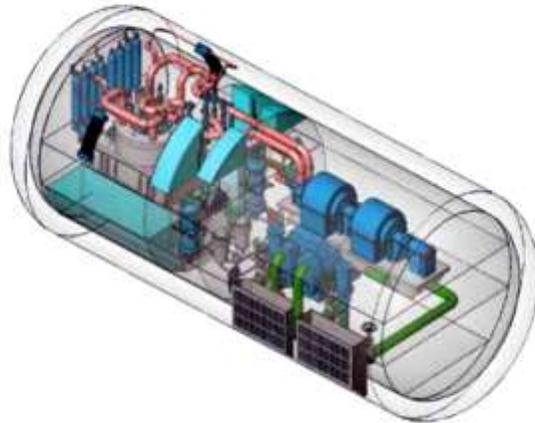
- ✓ Предел прочности $\sigma_b \geq 540$ МПа при $T=350^\circ\text{C}$
- ✓ Предел текучести $\sigma_{0,2} \geq 450$ МПа при $T=350^\circ\text{C}$
- ✓ Пластичность $\delta \geq 12\%$ при $T=350^\circ\text{C}$
- ✓ Длительная прочность ≥ 300 МПа при $T=350^\circ\text{C}$
- ✓ Высокая коррозионная стойкость в среде первого контура
- ✓ Радиационная стойкость при $T_{\text{обл.}}$ до $F=3 \times 10^{20}$ н/см²

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/см² 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

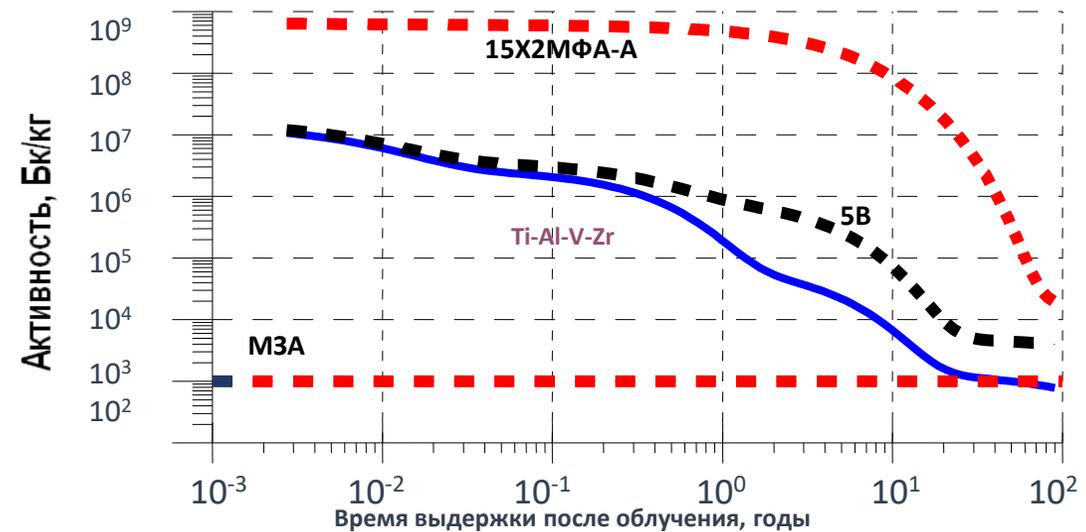
с атомным реактором интегрального типа из титанового сплава

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./см² (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 «Курчатовский 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 «Курчатовский 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 «Курчатовский 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.

