

На правах рукописи



УДК 669.15-194.56: 621.039.534: 620.179  
ГРНТИ 44.33.29

**ВАСИЛЬЕВ Николай Валерьевич**

**РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ  
СЕНСИБИЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ТРУБОПРОВОДОВ АЭС ИЗ СТАЛИ 08X18H10T**

Специальность 05.16.09 - материаловедение (машиностроение)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2018

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии  
«Центральный научно-исследовательский институт  
конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

**Научный руководитель:**

**Карзов  
Георгий  
Павлович**

Доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки  
РФ

**Научный консультант:**

**Петров  
Владимир  
Анатольевич** Кандидат технических наук; Федеральное государственное  
унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский  
институт конструкционных материалов «Прометей» имени  
И.В. Горынина Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»;

**Официальные оппоненты:**

**Судаков  
Александр  
Вениаминович** Доктор технических наук, профессор;  
Открытое акционерное общество «Научно-производственное  
объединение по исследованию и проектированию энергетического  
оборудования им. И.И. Ползунова»; главный научный сотрудник

**Гетман  
Александр  
Федорович** Доктор технических наук, профессор;  
Акционерное общество «Всероссийский Научно-  
исследовательский институт по эксплуатации атомных  
электростанций», начальник отдела

**Ведущая организация:**

Государственный научный центр Российской Федерации  
Акционерное общество «Научно-производственное объединение  
«Центральный научно-исследовательский институт технологии  
машиностроения», г. Москва

Защита состоится « 18 » апреля 2018 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании  
диссертационного совета Д411.006.01 при Федеральном государственном унитарном  
предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных  
материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского  
центра «Курчатовский институт» по адресу: 191015, г. Санкт-Петербург, Шпалерная  
ул., д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт»  
- ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте:

<http://dissovet.crim-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=21>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д411.006.01  
Заслуженный деятель науки РФ,  
д. т. н., профессор



В.А. Малышевский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы.**

Основным конструкционным материалом, используемым в атомном машиностроении для систем трубопроводов первого контура, является коррозионностойкая сталь марки 08X18H10T. Применение этой стали обусловлено ее высокой коррозионной стойкостью, технологичностью и широкой номенклатурой проката, освоенной промышленностью. Однако, при эксплуатации трубопроводов из стали 08X18H10T одноконтурных АЭС с реакторными установками (РУ) РБМК имели место случаи повреждений, вызванные образованием и распространением в околошовной зоне (ОШЗ) сварных соединений коррозионных трещин межкристаллитного характера.

Аналогичные дефекты были обнаружены на оборудовании и трубопроводах зарубежных водо-водяных реакторов, выполненных из стабилизированных коррозионностойких сталей AISI 321 и AISI 347, а также нестабилизированной стали AISI 304.

Исследования показали, что такие повреждения вызваны проявлением склонности отдельных участков сварных соединений к межкристаллитному коррозионному растрескиванию под напряжением (МКР), основной причиной которого является сенсibilизация материала под действием процесса сварки. Под сенсibilизацией понимают выделение карбидов хрома по границам зерен, приводящее к снижению содержания хрома в твердом растворе в приграничных областях и к снижению коррозионной стойкости этих областей в целом. Разрушения происходят при одновременном воздействии коррозионно-активной среды, высоких рабочих и технологических остаточных сварочных растягивающих напряжений от термического воздействия на металл при сварке или нарушений технологического цикла при изготовлении полуфабриката еще в заводских условиях.

Для систем трубопроводов, находящихся в эксплуатации, снижение степени сенсibilизации металла и, соответственно, склонности к растрескиванию сварных соединений аустенитных трубопроводов достигается проведением компенсирующих мероприятий, направленных на снижение до безопасных уровней сенсibilизации металла, наиболее технологичным из которых является аустенизация - высокотемпературная термическая обработка с использованием индукционного нагрева (ВТТО). Однако верификация применения данной технологии ограничивается отсутствием эффективных методов и средств контроля степени сенсibilизации.

В результате исследований установлено, что склонность сварных соединений к коррозионному растрескиванию под напряжением может проявляться при достаточно низких степенях сенсibilизации, порядка 1%, поэтому основной задачей таких методов должна быть количественная оценка низких уровней сенсibilизации и возможность ее определения как в лабораторных, так и в производственных условиях на самом изделии неразрушающим способом. До настоящего времени использование таких методов в производственных условиях ограничивалось отсутствием эффективных средств измерения степени сенсibilизации металла.

В настоящей работе сформулированы критерии и разработана процедура внедрения метода оценки уровня сенсibilизации аустенитных сталей,

позволяющие проводить контроль оборудования и трубопроводов при эксплуатации, а также оценить качество аустенизации сварных соединений трубопроводов, находящихся в эксплуатации. Для проведения расчетных оценок остаточного ресурса сварных соединений трубопроводов экспериментально получены расчетные скорости роста трещин, развивающихся по механизму межкристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением.

Таким образом, актуальность диссертационной работы заключается в решении важной научно-технической задачи – обеспечении ресурса трубопроводов Ду300 контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) реакторов РБМК-1000 при продлении их срока службы до 45 лет.

### **Цель и задачи.**

Целью диссертационной работы являлись:

- совершенствование метода потенциодинамической реактивации (ПДР) для экспресс оценки степени сенсibilизации металла трубопроводов из стали марки 08X18H10T;

- определение закономерностей инициирования и развития дефектов сварных соединений трубопроводов Ду300 реакторов РБМК-1000;

- разработка процедуры верификации и контроля качества технологии высокотемпературной термической обработки сварных соединений трубопроводов.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- определены закономерности сенсibilизации металла околошовной зоны сварных соединений и механизмы инициирования и развития дефектов сварных соединений трубопроводов Ду300;

- разработан и внедрен комплекс для оценки степени сенсibilизации стали марки 08X18H10T;

- были проведены исследования и построены зависимости по влиянию степени сенсibilизации на механические характеристики металла околошовной зоны сварных соединений трубопроводов Ду300 в среде теплоносителя РБМК;

- получены расчетные оценки скорости роста трещин в зависимости от степени сенсibilизации металла околошовной зоны и характера ее распределения вдоль линии сплавления сварного соединения;

- разработана методика оценки степени сенсibilизации металла сварных соединений трубопроводов из стали 08X18H10T на стадиях ремонта и эксплуатации на базе разработанных и внедренных технических средств;

- верифицирована и внедрена технология термической обработки сварных соединений трубопроводов Ду300 для обеспечения безопасной эксплуатации на проектный и продленный срок службы.

### **Научная новизна.**

На базе исследований по оценке сенсibilизации металла определены технические требования, разработан и внедрен диагностический комплекс «САХС» для оценки степени сенсibilизации стали марки 08X18H10T методом потенциодинамической реактивации.

Получены зависимости по влиянию сенсibilизации на механические свойства металла околошовной зоны сварных соединений трубопроводов в среде теплоносителя реакторов РБМК. На базе лабораторных исследований образцов определено пороговое значение степени сенсibilизации металла  $K_{ПДР} = 3\%$ , ниже

которого отсутствует влияние сенсibilизации на механические характеристики прочности и пластичности металла при нагружении в среде теплоносителя с различной скоростью деформирования. В то же время на исследованных натуральных сварных соединениях с трещинами были зафиксированы значения степени сенсibilизации металла в диапазоне  $1 \% \leq K_{ПДР} \leq 3 \%$ . Поэтому, для оценки целостности элементов трубопроводов введен коэффициент запаса, учитывающий масштабный фактор и реальную шероховатость поверхности, и обосновано критическое значение степени сенсibilизации проявления склонности металла ОШЗ сварного соединения к межкристаллитному растрескиванию  $[K_{ПДР}] = 1 \%$ .

Установлены зависимости скорости роста трещины по механизму межкристаллитного растрескивания от степени сенсibilизации металла и с учетом особенностей ее распределения вдоль линии сплавления сварного соединения трубопроводов из стали 08X18H10T. Для сильно сенсibilизированных участков ОШЗ сварного соединения ( $K_{ПДР} = 6 \div 15 \%$ ) максимальная оценка скорости роста трещины составила  $\dot{a}_{\max} = 4,3$  мм/год, для слабо сенсibilизированных участков ( $K_{ПДР} = 1 \div 6 \%$ )  $\dot{a}_{\max} = 1,1$  мм/год.

Рассчитана допустимая скорость роста трещины, ниже которой гарантировано обеспечение герметичности и прочности сварных соединений трубопроводов реакторов РБМК. При развитии трещины от 0 до 3 мм от внутренней поверхности сварного соединения допустимая скорость  $[\dot{a}] = 1,6$  мм/год, а при развитии трещины от 3 мм и более  $[\dot{a}] = 1,1$  мм/год.

Определен режим термической обработки и разработана методика подготовки образцов-эталонов из стали 08X18H10T, обеспечивающая равномерный уровень требуемых степеней сенсibilизации по рабочей части испытательного образца. На изготовленных эталонных образцах экспериментально определены зависимости по влиянию температуры проведения испытаний на результаты измерений степени сенсibilизации по методу потенциодинамической реактивации.

Усовершенствован метод ПДР в части введения корректирующих функций по влиянию температуры на результаты измерений, что позволило применить его в качестве неразрушающего метода эксплуатационного контроля степени сенсibilизации.

### **Практическая значимость работы.**

Изготовлен, сертифицирован и внедрен диагностический комплекс «САХС» для оценки степени сенсibilизации и склонности к межкристаллитной коррозии и коррозионному растрескиванию стали 08X18H10T.

С использованием подходов, изложенных в диссертационной работе, по оценке влияния температуры испытаний на результаты измерений степени сенсibilизации внесены изменения в РД ЭО 0411-02, а также разработана, одобрена «Ростехнадзором» и введена в действие «Методика оценки склонности к межкристаллитному коррозионному растрескиванию сварных соединений трубопроводов КМПЦ реакторов РБМК на основе метода потенциодинамической реактивации» № 1.3.3.99.0034-2009, позволяющая применять метод ПДР в качестве неразрушающего метода эксплуатационного контроля.

Выпущен стандарт предприятия № СТП УЕИА.246-2007 «Образцы из стали марки 08X18H10T с заданными уровнями сенсibilизации. Процедура аттестации».

Использование разработанной методики № 1.3.3.99.0034-2009 и диагностического комплекса «САХС» дало возможность подтвердить эффективность технологии и обосновать режим высокотемпературной термической обработки сварных соединений трубопроводов реакторов РБМК.

Для проведения аустенизации сварных соединений приварки доньшек раздаточно-групповых коллекторов (РГК) на энергоблоках №№ 1-4 Ленинградской АЭС разработаны и введены в действие следующие документы эксплуатирующей организации АО «Концерн «Росэнергоатом»:

- «Технологическая инструкция. Техническое обслуживание энергоблоков АЭС с реакторами РБМК установкой высокотемпературной индукционной термообработки для аустенизации узла приварки доньшек РГК», РД ЭО 0527-2004;

- «Рабочая инструкция для определения степени сенсбилизации методом ПДР основного металла на наружной поверхности трубопроводов Ду300 в зоне приварки доньшек РГК и Ду55 в производственных условиях», № РИ 60/6115-2006.

Выполнена термическая обработка металла сварных соединений приварки доньшек раздаточно-групповых коллекторов трубопроводов Ду300 энергоблоков №№ 1-4 Ленинградской АЭС.

Практическая значимость результатов работы подтверждена актом о внедрении в Филиале АО «Концерн Росэнергоатом» «Ленинградская АЭС».

#### **Методология и методы исследования.**

При работе над диссертацией был использован опыт эксплуатации аустенитных трубопроводов Ду300 реакторов РБМК-1000 в сочетании с экспериментальными материаловедческими исследованиями. На основании данных о механизмах повреждения, деформирования и разрушения сварных соединений сталей типа X18H10T, а также анализа и статистической оценки результатов экспериментальных исследований, создана методология, положения которой заложены в методику оценки степени сенсбилизации, разработаны процедуры верификации и внедрения технологии ВТТО сварных соединений доньшек раздаточно-групповых коллекторов энергоблоков №№ 1-4 Ленинградской АЭС.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

Зависимости, определяющие влияние степени сенсбилизации на механические характеристики прочности и пластичности металла околошовной зоны сварных соединений трубопроводов Ду300 из стали марки 08X18H10T реакторов РБМК-1000 при нагружении в среде теплоносителя с постоянной скоростью деформирования при определении склонности к межкристаллитному растрескиванию.

Зависимости скорости роста трещины по механизму МКР от степени сенсбилизации металла ОШЗ сварных соединений трубопроводов, позволяющие прогнозировать развитие трещины с учетом особенностей распределения сенсбилизации металла вдоль линии сплавления сварного соединения, полученные на основе металлографических и электрохимических исследований фактических эксплуатационных коррозионных повреждений трубопроводов.

Процедуры оценки и корректировки результатов измерений степени сенсбилизации, заложенные в «Методику оценки склонности к межкристаллитному коррозионному растрескиванию сварных соединений трубопроводов КМПЦ реакторов РБМК на основе метода потенциодинамической реактивации», № 1.3.3.99.0034-2009.

Применение метода ПДР для оценки степени сенсibilизации основного металла и металла околошовной зоны сварных соединений при верификации технологии ВТТО, а также в качестве неразрушающего метода контроля качества проведения термической обработки сварных соединений аустенитных трубопроводов РБМК-1000.

#### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность полученных результатов обеспечивается проведением экспериментов с достаточной воспроизводимостью и необходимым количеством повторных испытаний, а также сопоставлением результатов, полученных разными методами и сравнением с аналогичными результатами, полученными другими авторами.

Основные положения диссертационной работы были представлены на конференциях международного уровня:

1. Конференция молодых ученых специалистов ГНЦ ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» // Разработка принципов практического использования электрохимического метода потенциодинамической реактивации для оценки степени сенсibilизации металла сварных соединений аустенитных трубопроводов. Санкт-Петербург 7-9 июня 2003 г.

2. Девятая международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС» // Опыт аустенизации сварных соединений трубопроводов из аустенитной стали на энергоблоках Ленинградской АЭС. Санкт-Петербург, 6-8 июня 2006 г.

3. Девятая международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС» // Оценка коррозионной стойкости нержавеющей стали в эксплуатационных условиях. Санкт-Петербург, 6-8 июня 2006 г.

4. Научно-практическая конференция «Прочность и долговечность сварных конструкций в тепловой и атомной энергетике» // Метод борьбы с коррозионными трещинами в сварных соединениях трубопроводов АЭС канального типа. Санкт-Петербург, 25-27 сентября 2007 г.

5. Десятая международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС» // Разработка и совершенствование методов и средств неразрушающего эксплуатационного контроля сенсibilизации трубопроводов АЭС канального типа. Санкт-Петербург, 7-9 октября 2008 г.

#### **Личный вклад автора.**

Автор является одним из разработчиков диагностического комплекса «САХС» для оценки степени сенсibilизации и склонности к межкристаллитной коррозии и коррозионному растрескиванию аустенитных сталей методом потенциодинамической реактивации.

Автор выполнил лично или принимал непосредственное участие во всех исследованиях, представленных в настоящей диссертации:

- в металлографических и электрохимических исследованиях особенностей распределения степени сенсibilизации по металлу сварных соединений трубопроводов реакторов РБМК, содержащих реальные дефекты;

- в получении зависимостей, определяющих влияние степени сенсibilизации на механические характеристики металла околошовной зоны сварных соединений трубопроводов Ду300 РБМК при нагружении в среде теплоносителя с различной скоростью деформирования;

- в разработке зависимостей скорости роста трещины от уровня сенсibilизации и характера ее распределения вдоль линии сплавления сварного соединения;

- в разработке технологии и изготовлении образцов-эталонов из стали 08X18H10T с заданными степенями сенсibilизации;

- в установлении зависимостей результатов измерений степени сенсibilизации образцов-эталонов из стали 08X18H10T от температуры проведения испытаний по методу потенциодинамической реактивации;

- в определении линейных корреляционных зависимостей корректировки значений степени сенсibilизации, измеренных при различных температурах, на стандартную температуру  $T=25^{\circ}\text{C}$ ;

- в верификации и внедрении технологии термической обработки сварных соединений трубопроводов энергоблоков №№ 1-4 Ленинградской АЭС.

Все документы, определяющие практическую значимость диссертационных исследований, разработаны с непосредственным участием автора диссертации.

#### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ: 9 научных статей и 5 тезисов докладов, в том числе 4 статьи в рецензируемых научно-технических изданиях, рекомендованных ВАК.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 197 страницах, содержит 129 рисунков и 29 таблиц. Библиографический список содержит 73 наименования.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** раскрыта актуальность работы, обоснована постановка проблемы и поставлены задачи по ее решению. Определена научная новизна и практическая ценность результатов проведенных исследовательских и экспериментальных работ.

**В первой главе** приведены результаты анализа опыта эксплуатации трубопроводов кипящих реакторных установок, выявлено, что основным повреждающим механизмом является межкристаллитное коррозионное растрескивание под напряжением сварных соединений трубопроводов Ду300 РБМК-1000 из стали марки 08X18H10T.

Выявлены основные факторы, определяющие склонность сварных соединений трубопроводов к МКР:

- сенсibilизация металла околошовной зоны выше критических значений;
- превышение содержания кислорода в теплоносителе до концентраций  $[\text{O}_2] \geq 0,1$  мг/кг;

- наличие остаточных и рабочих растягивающих напряжений в зоне корня шва порядка предела текучести  $\sigma_{0,2}$ .



Основным направлением исследований в последнее время было выявление условий, которые могли бы привести к МКР сварных соединений трубопроводов из стали марки 08X18H10T в процессе их эксплуатации.

Процесс сенсбилизации металла околошовной зоны сварного соединения связывают с термическим воздействием на металл при сварке или нарушениями технологического цикла при изготовлении полуфабриката в заводских условиях.

Сенсбилизация стали при сварке происходит в результате следующих процессов:

- растворения карбидов титана при температурах выше 1200°C и появления в аустените неравновесного углерода;
- образования карбидов хрома при температурах 550-750°C по границам зерен в ОШЗ при охлаждении и повторных нагревах при сварке, в результате чего снижается содержание хрома в этих зонах и, соответственно, коррозионная стойкость по границам зерен.

Рассмотрены данные по распределению сенсбилизации вдоль трещин на сварных соединениях трубопроводов Ду300 Ленинградской АЭС. Как правило, трещина развивается с одной стороны сварного шва в околошовной зоне по области с большей сенсбилизацией. Зона с максимальной сенсбилизацией начинается от корня шва, постепенно уменьшаясь.

Представлен анализ оценки остаточных сварочных напряжений (ОСН), исходя из которого установлено, что поле ОСН неоднородно по сечению сварного соединения, максимальные растягивающие окружные ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) ОСН локализованы на наружной поверхности трубопровода в области усиления шва, в то же время максимальные осевые напряжения ( $\sigma_{zz}$ ) ОСН локализованы в районе корня шва и являются также растягивающими.

Рассмотрены модели и основные закономерности образования и роста межкристаллитных коррозионных трещин. Приведены зависимости скорости развития трещины от скорости деформирования при различных условиях влияния коррозионной среды.

Анализ литературных источников по исследованиям механизмов роста трещин сварных соединений трубопроводов Ду300 показал, что основные закономерности их развития заключаются в следующем:

- скорость роста трещины зависит от распределения исходной степени сенсбилизации металла околошовной зоны в направлении толщины и периметра сварного шва; и также зависит от состава среды в полости трещины, прежде всего содержания кислорода ( $[O_2] \geq 0,1$  мг/кг).
- трещина растет с убывающей скоростью, корреляционно зависящей от величины коэффициента интенсивности напряжений (КИН);
- вдоль сварного шва трещина развивается слиянием очагов инициирования МКР и характеризуется высокими значениями скоростей роста  $\dot{a} > 1$  мм/год.

Результаты исследований поврежденных трубопроводов Ду300 на АЭС с реакторами РБМК позволили установить следующее:

- трещины (рисунок 1) инициируются на внутренней поверхности в зоне термического влияния сварного соединения трубопровода вблизи линии сплавления со стороны основного металла на расстоянии 2-5 аустенитных зерен (в околошовной зоне);

- аустенитные зерна в этой зоне, благодаря воздействию термического цикла сварки, имеют большие размеры (1-3 балла) по сравнению с мелкозернистой (5-9 баллов) структурой основного металла трубы;
- трещины повторяют конфигурацию линии сплавления; они растут вглубь по толщине стенки трубы и в кольцевом направлении по периметру трубы;
- трещины имеют ветвистый характер, распространяются, как правило, по зоне укрупненного зерна и очень редко развиваются в металл сварного шва; во всех случаях максимальная глубина трещины не превышает 80 % толщины стенки трубы;
- образование протяженных трещин в кольцевом направлении происходит за счет слияния (в процессе их развития) первоначально появившихся зародышевых трещин, расположенных одна за другой по периметру трубы;
- трещины отмечались в сварных соединениях трубопроводов, изготовленных как на заводе-изготовителе, так и выполненных в монтажных условиях на АЭС.

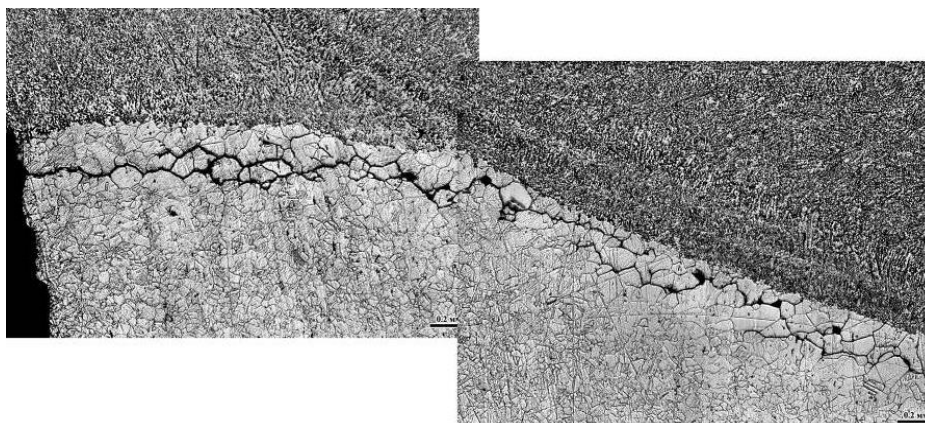


Рисунок 1 – Характерный вид межкристаллитной коррозионной трещины, распространяющейся по околошовной зоне сварного соединения трубопровода (x35)

При решении основной практической задачи - обеспечения надежной и безопасной работы трубопроводов в течение всего срока службы - возможны два пути, а именно:

а) воздействие на материал и условия эксплуатации таким образом, чтобы исключить образование повреждений, подобных межкристаллитному растрескиванию,

б) обеспечение периодического неразрушающего контроля и определения характеристик материалов, которые совместно могли бы служить основой безопасной эксплуатации АЭС.

Определение влияния сенсibilизированного состояния металла на образование и развитие трещин по механизму МКР ограничивается отсутствием технических средств, позволяющих проводить количественную оценку степени сенсibilизации металла. Большинство применяемых методов для оценки сенсibilизации используются для качественной оценки и не могут дать надежный критерий оценки.

Проведенный анализ электрохимических и металлографических методов определения сенсibilизации аустенитных сталей показал, что наиболее полно для количественной оценки степени сенсibilизации можно применить известный метод потенциодинамической реактивации.

Сущность метода ПДР (рисунок 2) заключается в том, что испытуемый образец, или часть его поверхности, потенциодинамически поляризуется с

определенной заданной скоростью в заданном диапазоне потенциалов последовательно в прямом (анодном) и обратном (катодном) направлениях. При прямой развертке производится анодная поляризация образца от потенциала начала активации  $\Phi_{\text{на}}$  в активную, начиная с потенциала коррозии  $\Phi_{\text{корр}}$ , а затем в пассивную область. При обратной развертке производится катодная поляризация из пассивной области в активную до условно определенного потенциала.

В качестве критерия степени сенсбилизации  $K_{\text{ПДР}}$  при испытании данным методом используется отношение накопленных зарядов  $Q_p/Q_{\text{п}}$ , т.е. площадей под кривыми реактивации ( $Q_p$ ) и активации ( $Q_{\text{п}}$ ), либо отношение максимальных токов  $I_p^{\text{max}}/I_{\text{п}}^{\text{max}}$ , получаемых путем обработки поляризационных кривых, снятых последовательно в анодном и катодном направлениях:

$$K_{\text{ПДР}} = I_p^{\text{max}}/I_{\text{п}}^{\text{max}} \cdot 100 \%, \text{ где:} \quad (1)$$

- значение тока  $I_{\text{п}}^{\text{max}}$  – соответствует максимальному значению потенциала при прямой развертке и характеризуется потенциалом пассивации  $\Phi_{\text{п}}$ , т.е. потенциалом, при котором начинает происходить пассивация металла образца;

- значение тока  $I_p^{\text{max}}$  – максимальному значению при обратной развертке потенциала и характеризуется потенциалом репассивации  $\Phi_{\text{реп}}$ , т.е. потенциалом, при котором повторно происходит пассивация металла образца после активного растворения границ зерен.

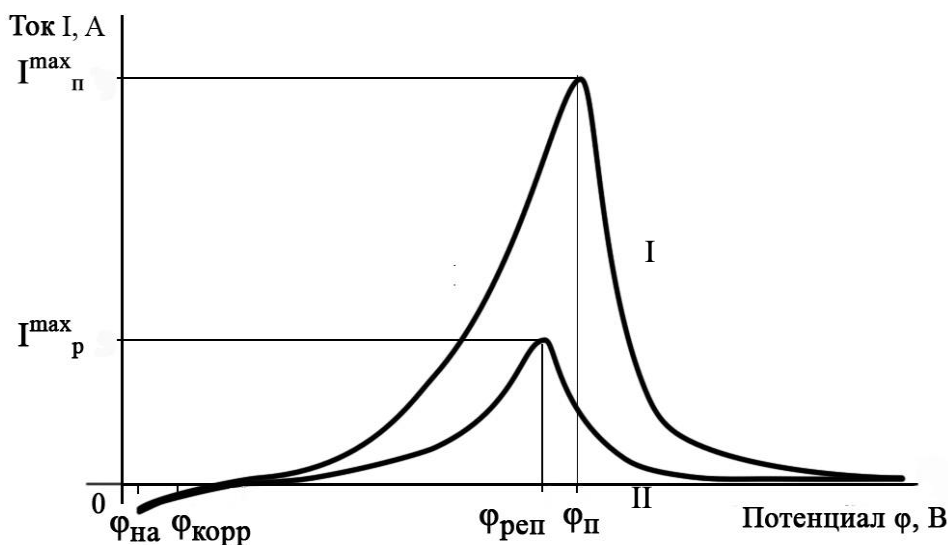


Рисунок 2 – Типичные анодные потенциодинамические кривые пассивации (I) и реактивации (II), получаемые при испытании сталей методом ПДР

Пик анодного тока сенсбилизированной стали, регистрируемый при проведении реактивации, связан с активным анодным растворением тех участков исследуемой поверхности стали, где произошло понижение содержания хрома - основного легирующего элемента, придающего стали повышенную коррозионную стойкость. Обедненные хромом зоны прилегают к границам зерен стали, где преимущественно формируются обогащенные хромом карбидные фазы. Физическая сущность выявления сенсбилизации заключается в следующем: после проведения анодной поляризации образца проводится обратная развертка потенциала в область активного растворения, при этом у запассивированного материала с электрохимической неоднородной структурой может начаться растворение

пассивной пленки – реактивация. Это обусловлено тем, что пассивная пленка на приграничных участках зерен, обедненных хромом, оказывается нестабильной в отличие от пленки на основном металле, не имеющей электрохимической неоднородности. Зоны металла, обедненные хромом, оказываются, таким образом, исходной областью растворения. В результате сила тока растворения при обратной развертке становится показателем степени обеднения хромом по границам зерен за счет карбидной реакции:



Критические значения уровней сенсibilизации нормированы и составляют:

- при значениях  $K_{\text{ПДР}} = 11 \%$  и более металл проявляет склонность к межкристаллитной коррозии (МКК) в соответствии с ГОСТ 9.914-91;
- начиная с  $K_{\text{ПДР}} = 1 \%$  и более металл ОШЗ сварного соединения проявляет склонность к растрескиванию в соответствии с РД ЭО 0411-02.

Таким образом, метод потенциодинамической реактивации позволяет:

- выявлять низкие степени сенсibilизации, которые не вызывают межкристаллитной коррозии, но способны вызвать коррозионное растрескивание;
- использовать его как неразрушающий метод при лабораторных исследованиях и эксплуатационном контроле непосредственно на оборудовании, если использовать портативный потенциостат и специальный электрохимический датчик;
- использовать как большие, так и локальные участки поверхности для проведения испытаний, что дает возможность применения данного метода на основном металле, а также и в околошовной зоне сварных соединений.

Однако, главным фактором, ограничивающим применение вышеуказанного метода, является отсутствие эффективных технических средств: это относится к потенциостату и электрохимической ячейке.

**Вторая глава** посвящена разработке оборудования для оценки степени сенсibilизации, также в ней систематизированы результаты проведенных исследований по влиянию сенсibilизации на механические характеристики металла сварных соединений аустенитных трубопроводов и дана оценка скорости подраста межкристаллитной трещины в металле околошовной зоны сварного соединения.

В результате проведенного анализа возможностей оценки склонности сварных соединений к коррозионному растрескиванию путем определения количественных значений уровня сенсibilизации металла сформулированы основные требования к разрабатываемому диагностическому комплексу для оценки степени сенсibilизации аустенитных материалов.

По заданию АО «Концерн «Росэнергоатом» был разработан и изготовлен портативный диагностический комплекс «САХС», позволяющий в полной мере проводить испытания по оценке склонности аустенитных нержавеющей сталей к межкристаллитной коррозии (МКК) и коррозионному растрескиванию. В 2006 г. были проведены работы по приемочным испытаниям и внедрению комплекса на Ленинградской АЭС.

Разработанный комплекс, представленный на рисунке 3, прошел метрологическую аттестацию и внесен в Государственный Реестр средств измерений и получил регистрационный номер № 29464-05 и сертификат об утверждении типа средства измерения «САХС». Комплекс обеспечивает заданные характеристики, а именно:

- диапазон измерения токов пассивации и реактивации от  $10^{-10}$  А до 250 мА; работа комплекса с малыми токами позволяет проводить оценку по площади около  $0,5 \text{ мм}^2$ , что позволяет оценивать сенсбилизацию в узкой околошовной зоне сварного соединения;

- работа комплекса в широком диапазоне температур от 5 до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- работа как с портативным электрохимическим датчиком, так и с лабораторной ячейкой;

- наличие графического дисплея, позволяющего отображать поляризационные кривые с текущими значениями потенциала и тока;

- наличие внутренней базы данных результатов и возможность передачи и сохранения данных испытаний на внешнее устройство.

- питание прибора как от сети 220 В, так и от автономного источника, что дает возможность проводить измерения непосредственно на изделии.



Рисунок 3 – Диагностический комплекс «САХС»

С помощью диагностического комплекса «САХС» были подготовлены образцы металла трубопровода Ду300 энергоблока №1 Ленинградской АЭС с различной степенью сенсбилизации и проведены коррозионно-механические испытания при нагружении металла образцов с постоянной скоростью деформирования в воде состава теплоносителя РБМК и на воздухе, включающие:

- определение зависимостей изменений механических свойств металла околошовной зоны сварных соединений трубопроводов в среде теплоносителя от степени сенсбилизации и скорости деформирования;

- получение расчетных зависимостей скорости роста трещины МКР от степени сенсбилизации металла, скорости деформирования, состава и температуры воды;

- исследования основных закономерностей распределения сенсбилизации вдоль линии сплавления сварного шва;

- проведение оценки скорости подраста трещины МКР в металле околошовной зоны сварного соединения трубопровода.

Из отобранного фрагмента были вырезаны заготовки, которые подвергались термообработке в три стадии:

- электронагрев до температуры  $T = 1200^\circ\text{C}$ , выдержка 10 с, с охлаждением заготовок в воде, за это время происходит рост зерна аустенита от 6-го балла до 2-3-го балла и частичное растворение карбидов титана, таким образом образцы имитируют металл околошовной зоны сварного соединения;

- аустенизация – при температуре  $T = 1050^{\circ}\text{C}$  с выдержкой в течение 1 часа и охлаждением на воздухе для устранения исходной неоднородности по критерию сенсбилизации;

- провоцирующий отжиг при температуре  $635^{\circ}\text{C}$ , с различными выдержками для достижения заданных уровней сенсбилизации.

Дополнительно были использованы образцы, вырезанные из сварных соединений трубопроводов Ду300 после эксплуатации порядка 120 тыс. часов.

Коррозионно-механические испытания проводили на модернизированных машинах АИМА-5-2, в водной среде с исходным содержанием кислорода  $[\text{O}_2] = 5 \div 8$  мг/кг и при температуре  $T = 290^{\circ}\text{C}$ . Как показывает практика эксплуатации РБМК-1000, теплоноситель контура принудительной циркуляции на стояночном режиме может обогатиться кислородом до 5-8 мг/кг, что при пусковом режиме создает условия, способствующие образованию трещин.

Деформирование образцов проводилось со скоростями перемещения захватов  $\dot{\epsilon} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$  и  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ . В процессе испытаний снимались диаграммы зависимости нагрузки (P) от перемещения захватов ( $\Delta$ ), по которым определяли максимальную нагрузку  $P_{\text{max}}$ . На разрушенных образцах оценивались величины относительного удлинения и относительного сужения.

Оценку стойкости против коррозионного растрескивания проводили по снижению следующих параметров: максимального номинального напряжения  $\sigma_{\text{max}}$ , получаемого из диаграммы деформирования при испытании в среде, относительного удлинения  $\delta^{\text{с}}$  и относительного сужения  $\psi^{\text{с}}$  при испытаниях с постоянной скоростью деформирования в среде относительно параметров предела прочности  $\sigma_{\text{в}}$ , относительного удлинения  $\delta$  и относительного сужения  $\psi$ , полученных в испытаниях на воздухе при той же температуре, а также по механизму разрушения образца.

После испытаний с постоянной скоростью деформирования были выполнены металлографические исследования основного металла и металла ОШЗ образцов и фрактографические исследования изломов.

Результаты испытаний образцов с ПСД показали:

- образцы с степенями сенсбилизации  $K_{\text{ПДР}} \leq 3\%$  не проявляют склонности к МКР: наблюдался вязкий характер разрушения образцов. Поверхностных трещин, характеризующих проявление межкристаллитного растрескивания, на металле образцов не обнаружено;

- при  $K_{\text{ПДР}} > 3\%$  образцы проявили склонность к МКР: в изломе образцов появлялась хрупкая составляющая, увеличивающаяся с ростом сенсбилизации образцов; также, по мере повышения степени сенсбилизации, наблюдалось снижение механических характеристик  $\sigma_{\text{max}}$ ,  $\delta$  и  $\psi$  и отношений  $\sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{в}}$ ,  $\delta^{\text{с}}/\delta$ ,  $\psi^{\text{с}}/\psi$ .

При испытаниях образцов в воде высоких параметров с при  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$  наблюдалось значительное снижение механических характеристик металла ОШЗ ( $\sigma_{\text{max}}$ ,  $\delta$  и  $\psi$ ) по сравнению с указанными характеристиками, имевшими место при испытаниях при  $\dot{\epsilon} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$  (рисунок 4).

После провоцирующей термообработки при температуре  $T = 600^{\circ}\text{C}$  с выдержкой в течение 26-ти часов, при  $K_{\text{ПДР}} = 11\%$ , образцы в испытаниях с постоянной скоростью деформирования при  $\dot{\epsilon} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$  разрушились по хрупкому механизму по металлу околосварной зоны.

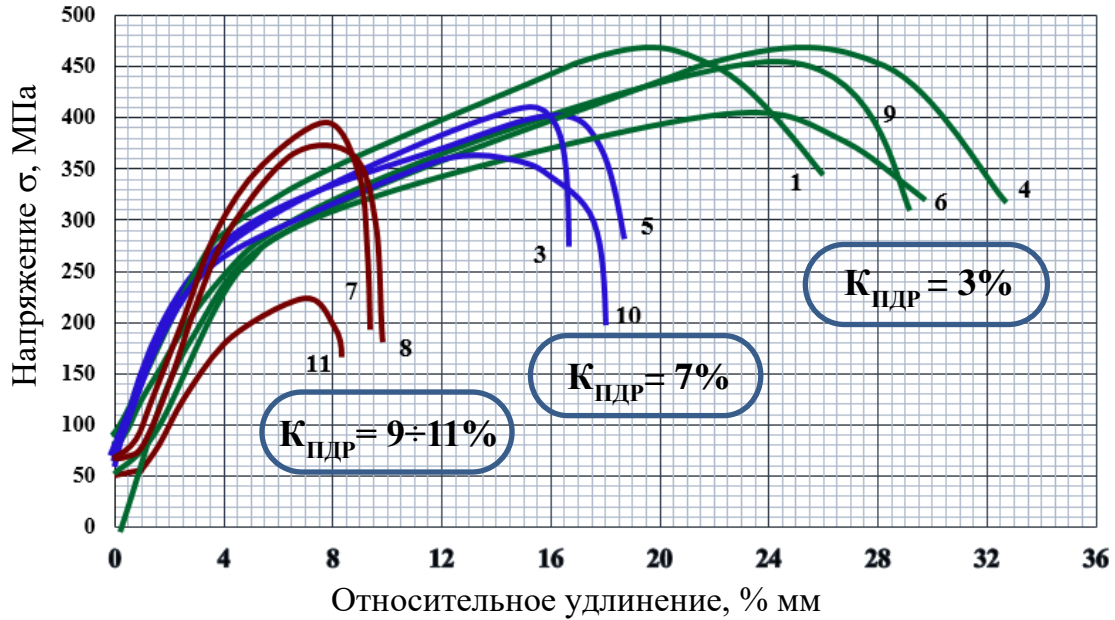


Рисунок 4 – Обобщенные результаты испытаний с ПСД образцов в среде теплоносителя (кривые №№ 1, 3-9 со скоростью деформирования  $\dot{\epsilon} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$ ; кривые №№ 10,11 с  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$ )

По результатам коррозионно-механических испытаний с постоянной скоростью деформирования образцов с различными степенями сенсibilизации были построены зависимости механических характеристик  $\sigma_{\max}$ ,  $\delta$  и  $\psi$  на воздухе и в воде от степени сенсibilизации металла, пример зависимостей представлен на рисунке 5. Более детально зависимости механических характеристик  $\sigma_{\max}$ ,  $\delta$  и  $\psi$  на воздухе и в воде от степени сенсibilизации металла представлены в диссертации.

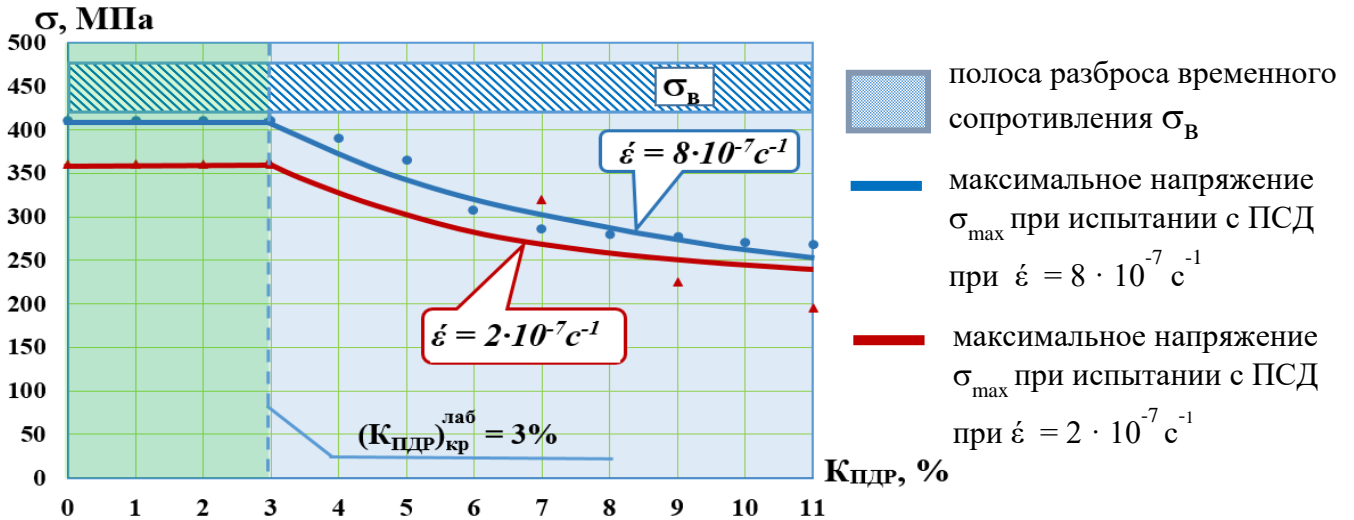


Рисунок 5 – Зависимость снижения максимальной нагрузки  $\sigma_{\max}$  от степени сенсibilизации металла  $K_{\text{ПДР}}$  при испытаниях с ПСД в среде и на воздухе

По результатам коррозионно-механических испытаний образцов установлено критическое значение степени сенсibilизации  $(K_{\text{ПДР}})_{\text{кр}}^{\text{лаб}} = 3\%$ , начиная с которого проявляется снижение механических характеристик в среде теплоносителя РБМК.

В то же время, при оценке сенсibilизации вдоль фронта исследованных трещин были выявлены значения сенсibilизации  $K_{\text{ПДР}}$  порядка 1 %.

Очевидно, что при оценке критического значения степени сенсibilизации  $[K_{\text{ПДР}}]$  при испытаниях с ПСД необходимо вводить коэффициент запаса  $n_s$ ,

учитывающий масштабный фактор и шероховатость поверхности образцов и определяемый уравнением:

$$n_s = \frac{(K_{ПДР})_{кр}^{лаб}}{[K_{ПДР}]} = 3 \quad (3)$$

Таким образом, можно считать обоснованным критическое значение степени sensibilizации для склонности металла околошовной зоны к МКР  $[K_{ПДР}] = 1\%$ .

В главе 2 также приведены результаты исследований фактического распределения степени sensibilizации вдоль линии сплавления сварных швов на фрагментах трубопроводов Ду300 энергоблоков №№ 1-4 Ленинградской АЭС, содержащих реальные дефекты различной глубины и протяженности (всего 24 сварных соединений). Фактическое распределение степени sensibilizации вдоль линии сплавления приведено на рисунке 6.

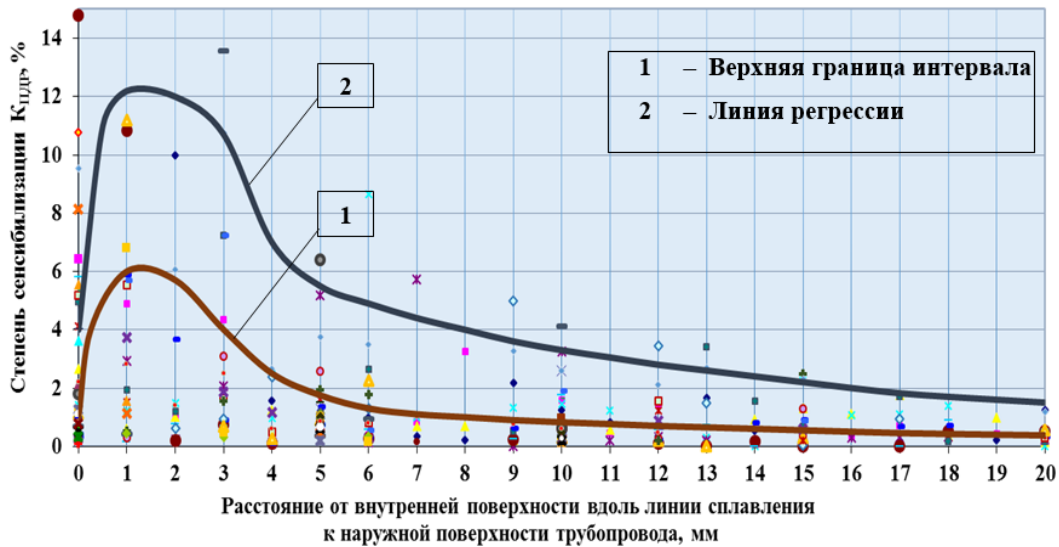


Рисунок 6 – Фактические значения, линия регрессии и верхняя (95%) граница интервала степени sensibilizации металла околошовной зоны вдоль линии сплавления сварных соединений трубопроводов

Из проведенных исследований следует, что протяженность зоны с наибольшей степенью sensibilizации составляет порядка 3 мм от корня шва вдоль линии сплавления к наружной поверхности. При этом максимальная величина  $K_{ПДР}$  может достигать 10% и более, далее вдоль линии сплавления на расстоянии свыше 3 мм от корня шва величина  $K_{ПДР}$  составляет не более 5%. Результаты исследований показывают, что проявление и максимальный рост межкристаллитных коррозионных трещин можно ожидать в зоне от 0 до 3 мм от внутренней поверхности.

На сварных стыках с реальными дефектами, вырезанных с Ленинградской и Игналинской АЭС, был проведен анализ скоростей роста дефектов. Эмпирическим путем по времени зарождения дефекта, подросту за межконтрольный период и реальным размером дефекта после вырезки был получен массив данных по средним скоростям роста трещин.

На основании результатов исследований кинетики трещин МКР предложена процедура определения скорости трещины в металле ОШЗ сварного соединения трубопроводов Ду300. Получены статистические оценки скорости трещины от коэффициента интенсивности напряжений  $K$  (рисунок 7-а), в качестве расчетной



определена скорость 1,1 мм/год. На рисунке 7-б отмечены две области допустимых и недопустимых скоростей роста трещин. По скоростям в зеленой области графика можно делать оценку долговечности и допускать сварное соединение в эксплуатацию на ограниченный срок службы. При скоростях распространения трещин, соответствующих красной области рисунка 7-б, принимается решение о замене СС. Такие скорости в расчетах учитывать не допускается.

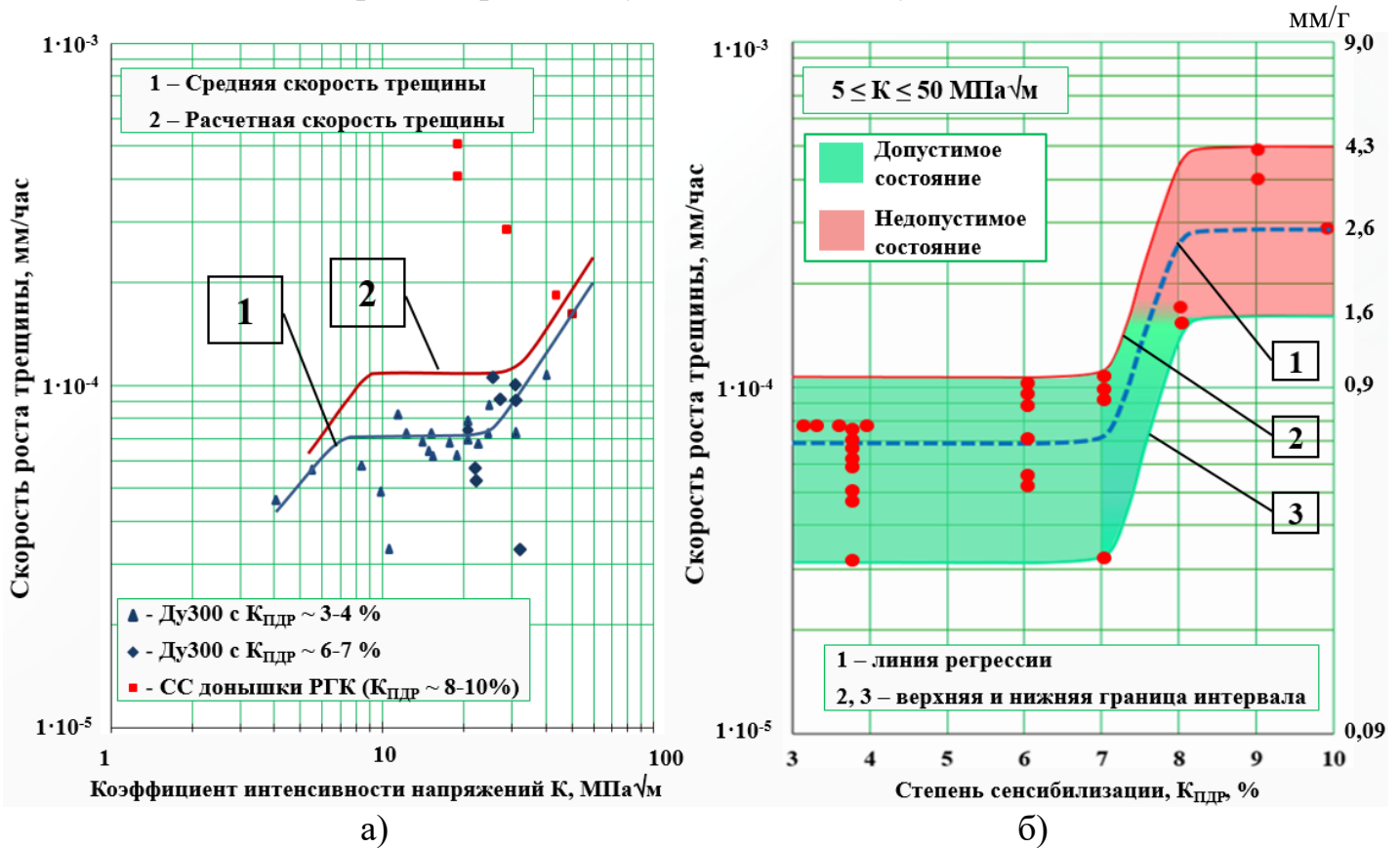


Рисунок 7 - Статистическая оценка зависимости скорости роста трещины от коэффициента интенсивности напряжений K (а) и степени сенсбилизации (б)

При проведении статистической обработки фактических данных по средним скоростям роста трещин построены накопленная частота и плотность вероятности скоростей роста трещин (рисунок 8).

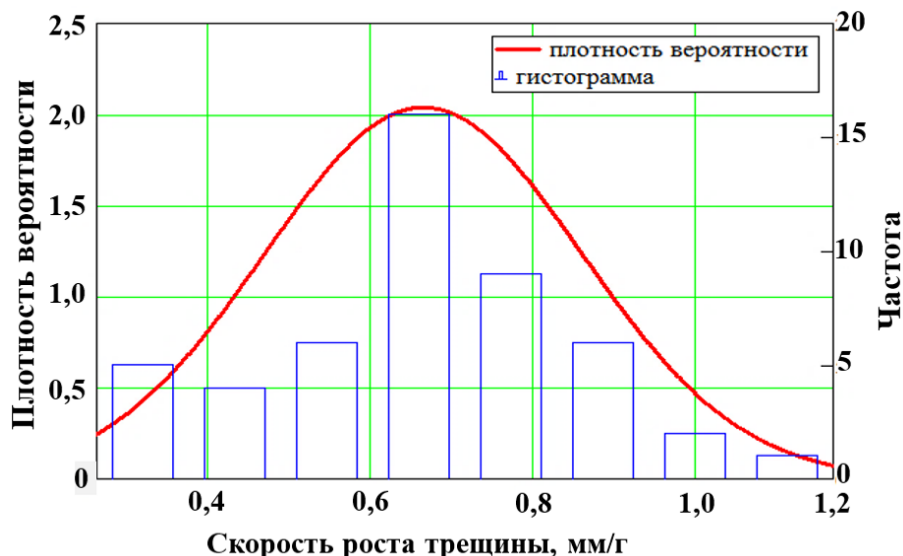


Рисунок 8 – Частота и плотность вероятности скорости роста трещины МКР

Установлено, что скорости 1,1 мм/год соответствует накопленная частота порядка 0,95.

На расстоянии от 0 до 3 мм в зоне корня шва от внутренней поверхности в металле ОШЗ реализуются:

- высокая степень сенсбилизации ( $6\% < K_{ПДР} \leq 15\%$ );
- жесткий упругопластический цикл деформирования металла и высокая исходная концентрация кислорода ( $[O_2] \leq 8$  мг/кг) на переходных режимах.

Допустимая скорость роста трещины в этой зоне регламентируется допуском, по условию прочности, глубиной трещины  $[a] = 10$  мм и длительностью межконтрольного периода  $\tau_{МК} = 6$  лет:

$$[\dot{a}] = [a] / \tau_{МК} = 1,6 \text{ мм/год} \quad (4)$$

На этом основании величину допустимой скорости трещины по механизму МКР в этой зоне предложено задать постоянной и равной 1,6 мм/год.

Рассчитана допустимая скорость роста трещины, ниже которой гарантировано обеспечение герметичности и прочности сварных соединений трубопроводов реакторов РБМК. При развитии трещины от 0 до 3 мм от внутренней поверхности сварного соединения допустимая скорость  $[\dot{a}] = 1,6$  мм/год, а при развитии трещины от 3 мм и более  $[\dot{a}] = 1,1$  мм/год.

Более высокие скорости роста трещин могут быть приняты в качестве расчетных только применительно к зоне высокой сенсбилизации глубиной до 3 мм от корня шва. На расстоянии свыше 3 мм рекомендуется принимать среднюю скорость трещины равной 1,1 мм/год или проводить ее оценку по нормативным зависимостям, с учетом приложенных механических, компенсационных и остаточных напряжений в соответствии с рисунком 9.



Рисунок 9 – Расчетная оценка скорости трещины МКР в глубину в металле околошовной зоны по толщине стенки трубопровода Ду300

**Третья глава** посвящена разработке методики оценки сенсбилизации и стойкости стали типа X18H10T против растрескивания в производственных условиях.

В главе 2 было отмечено, что достоверность оценки степени сенсбилизации методом потенциодинамической реактивации непосредственно на изделиях ограничивается различной температурой испытаний в производственных условиях.

Величина степени сенсibilизации при определении ее методом ПДР зависит от температуры помещения, в котором проводят измерения. Поскольку в помещениях АЭС не удастся обеспечить стандартную температуру ( $25 \pm 1$  °С), результаты измерений должны корректироваться с учетом поправки на фактическую температуру измерений.

Для внесения температурных поправок, а также для калибровки измерительных устройств необходимы эталонные образцы с различными степенями сенсibilизации, которые были выбраны исходя из известных критических значений в соответствии с ГОСТ 9.914-91 и РД ЭО 0411-02:

- 0–0,5 % и 7–9 % докритические значения для МКР и МКК соответственно,
- 2–3 % и 11–12 % закритические значения для МКР и МКК соответственно.

На каждом эталонном образце с помощью диагностического прибора «САХС» проводили не менее десяти измерений степени сенсibilизации при температуре, равной  $25 \pm 1$  °С.

Для подтверждения полученных значений степени сенсibilизации на образцах-эталонах, склонных и не склонных к межкристаллитной коррозии, были проведены испытания на стойкость против МКК по ГОСТ 6032. Образцы, подготовленные из партий заготовок с значениями степени сенсibilизации более 11 %, показали склонность к МКК при испытаниях арбитражным методом АМУ.

Соответствие полученных степеней сенсibilизации также определялось металлографическим анализом при травлении в щавелевой кислоте микрошлифов, подготовленных из образцов-эталонов.

Для решения задачи по применению метода ПДР при оценке степени сенсibilизации и стойкости аустенитных сталей против МКР непосредственно на трубопроводах АЭС выполнен учет температурных условий на результаты измерений. Для этого измерения сенсibilизации на эталонных образцах проводили в термостатированной электрохимической ячейке. Были получены массивы данных измерений степени сенсibilизации, определенных при температурах в диапазоне от 20 °С до 40 °С с шагом в 5 °С и соотнесенных с температурой  $T = 25$  °С, пример массива данных приведен на рисунке 10.

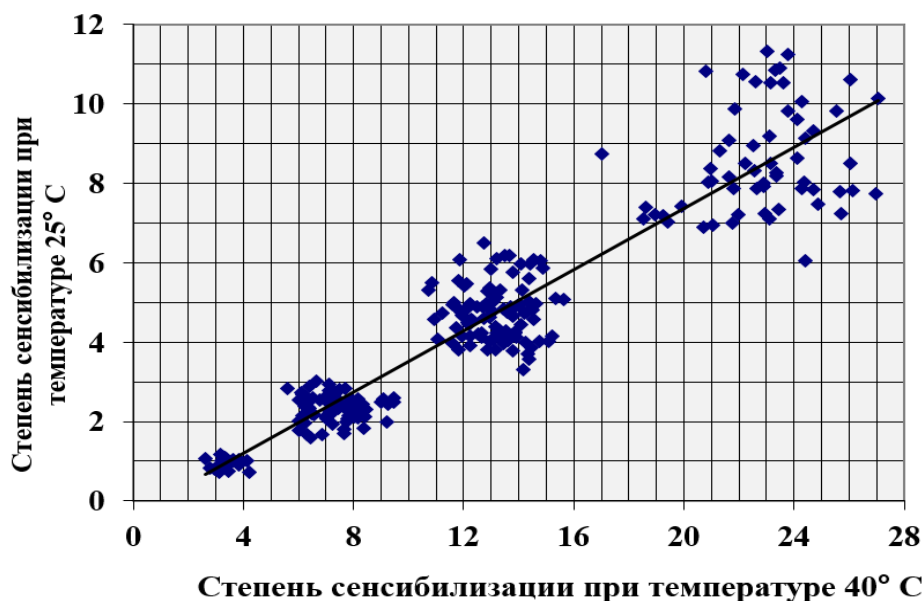


Рисунок 10 – Массив данных и линия регрессии по измерениям степени сенсibilизации при  $T = 40$  °С относительно стандартной температуры  $T = 25$  °С.

При каждой температуре на всех эталонных образцах проведено не менее 20 измерений. После проведения испытаний все результаты структурировались в виде отдельных зависимостей степени сенсibilизации, определенной при рабочей температуре, от степени сенсibilизации при стандартной температуре с линиями средних значений и границ областей средних отклонений. По полученным данным были построены линейные корреляционные зависимости корректировки результатов измерений при рабочих температурах на стандартную температуру.

Для каждой температуры в диапазоне от 15 до 40°C построены отдельные зависимости для корректировки значений степени сенсibilизации на стандартную температуру.

Общий вид линейной корреляционной зависимости для корректировки значений степени сенсibilизации на стандартную температуру представлен в виде:

$$K_{ПДР}^{25} = a_1 \cdot K_{ПДР}^T + a_2, \text{ где} \quad (3)$$

$K_{ПДР}^{25}$  - значение степени сенсibilизации при стандартной температуре;

$K_{ПДР}^T$  - значение степени сенсibilизации при рабочей температуре;

$a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты, определяемые по зависимостям на рисунке 11.

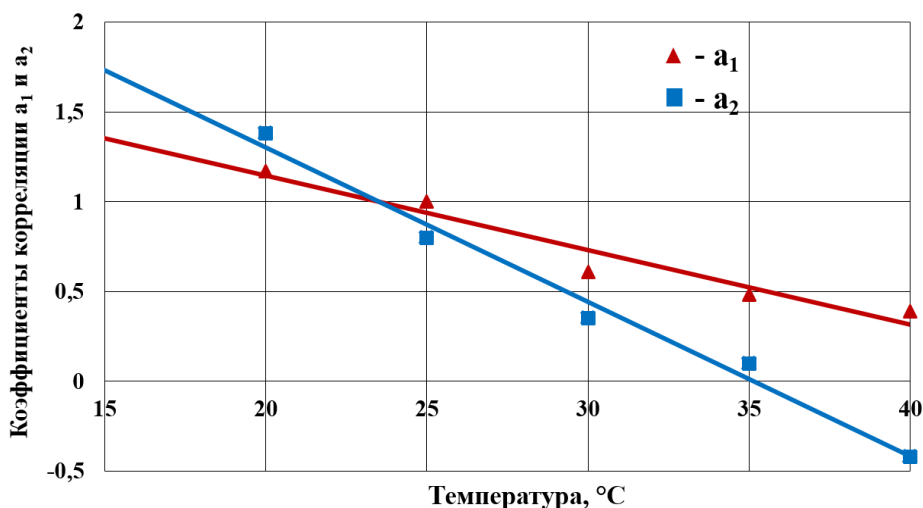


Рисунок 11 – Зависимость коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  от температуры испытаний

Значения коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  для температур в диапазоне  $T = 15 \div 19^\circ\text{C}$  получены путем экстраполяции соответствующих линейных зависимостей, построенных в диапазоне температур  $T = 20 \div 40^\circ\text{C}$  на данные температуры.

Разработанная процедура корректировки результатов измерений степени сенсibilизации для внесения температурных поправок позволила проводить измерения степени сенсibilизации непосредственно на оборудовании или трубопроводах, т.е. использовать метод ПДР в качестве неразрушающего метода. Оформлен нормативный документ АО «Концерн «Росэнергоатом» «Методика оценки склонности к межкристаллитному коррозионному растрескиванию сварных соединений трубопроводов КМПЦ реакторов РБМК на основе метода потенциодинамической реактивации», № 1.3.3.99.0034-2009.

**В четвертой главе** проведен анализ и обоснование выбора высокотемпературной термической обработки в качестве компенсирующего мероприятия по снижению склонности сварных соединений трубопроводов Ду300 РБМК к коррозионному растрескиванию. Приведены результаты

экспериментальных работ по верификации и внедрению технологии ВТТО сварных соединений трубопроводов энергоблоков Ленинградской АЭС.

Для реализации применения данной технологии термической обработки сварных соединений трубопроводов были выполнены экспериментальные работы по отработке и подтверждению эффективности ее проведения с точки зрения снижения склонности материала сварного соединения к образованию коррозионных трещин.

Для реализации поставленной задачи на Ленинградской АЭС были спроектированы и изготовлены два макета (рисунок 12), имитирующие сварные соединения приварки доньшек раздаточно-группового коллектора, далее на этих макетах была проведена аустенизация и выполнены исследования по оценке состояния металла сварного соединения до и после проведения термообработки.

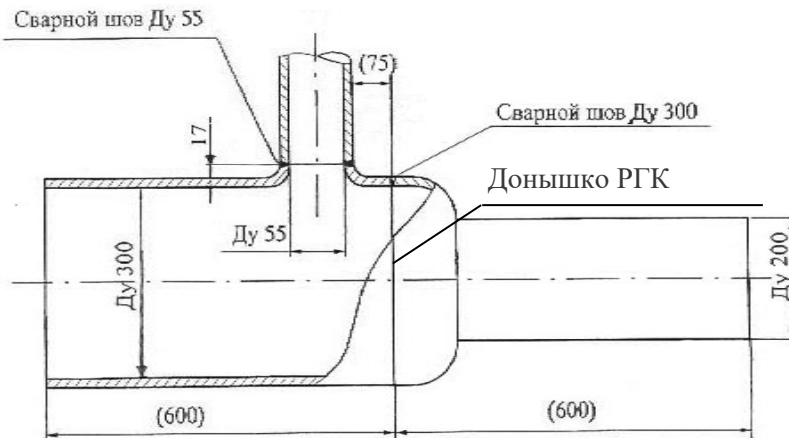


Рисунок 12 – Эскиз макета узла приварки доньшка раздаточно-групповых коллекторов для проведения аустенизации на стенде ЛАЭС

Для выполнения индукционной термической обработки сварных соединений разработана и изготовлена установка, включающая высокочастотный генератор, жесткий трехвитковый водоохлаждаемый индуктор, блок емкостной компенсации, а также блок управления и регистрации параметров.

Сварное соединение макета № 2 узла приварки доньшка коллектора проходило термообработку на изготовленной установке на Ленинградской АЭС по режиму: нагрев до температуры  $T = 1000^{\circ}\text{C}$  наружной поверхности с выдержкой  $t = 55$  минут.

Сварное соединение макета №3 проходило термообработку по режиму: нагрев до температуры  $T = 1040^{\circ}\text{C}$  наружной поверхности, с выдержкой  $t = 50$  минут.

Также для отработки аустенизации были использованы образцы - имитаторы металла околошовной зоны сварных соединений, вырезанные из фрагмента трубы Ду300 и термообработанные по режиму: нагрев до  $1200^{\circ}\text{C}$ , выдержка 5 секунд, охлаждение в воде. Далее образцы выдерживались в печи при  $600^{\circ}\text{C}$  от 10 до 22 часов.

Было выполнено сопоставление исходных степеней сенсibilизации с данными после проведения термической обработки, проведен металлографический анализ структур до и после аустенизации (рисунок 13), показавший устранение сенсibilизации металла околошовных зон сварных соединений макетов РГК в результате термообработки.

Для подтверждения эффективности примененной термической обработки были проведены сравнительные измерения степени сенсibilизации на сварных соединениях макетов, а также на искусственно сенсibilизированных образцах, до и

после проведения ВТТО. Измерения проводили на наружной и внутренней поверхности трубопроводов, а также по всему сечению сварного соединения.

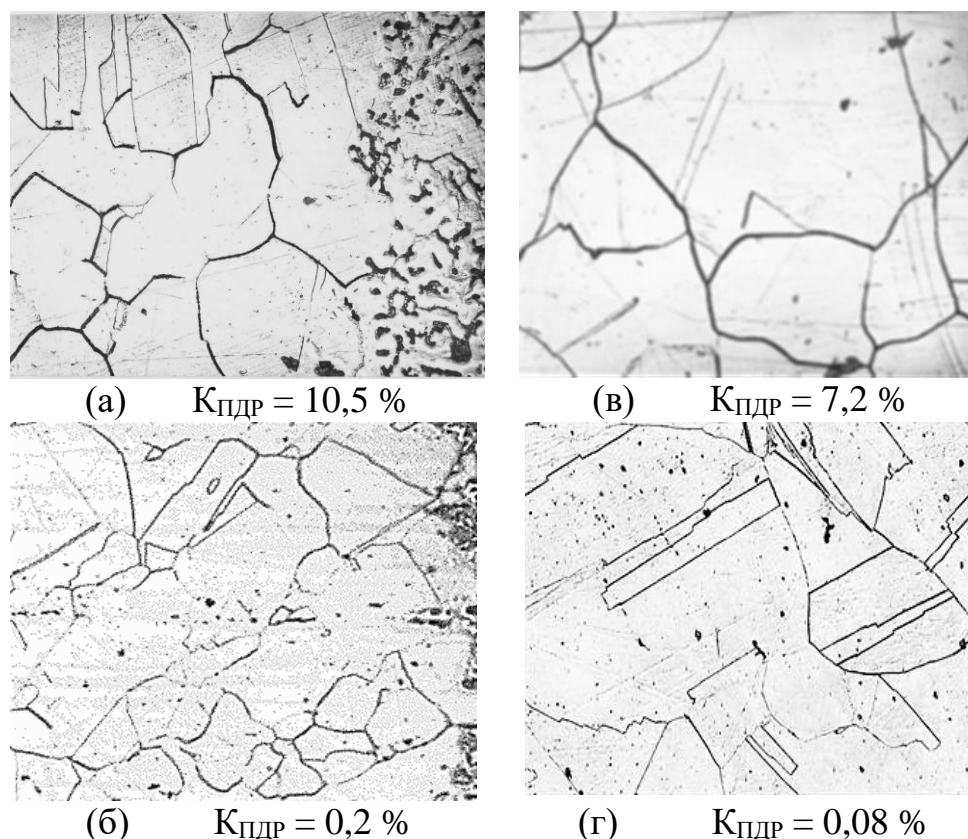


Рисунок 13 – Металл ОШЗ макета № 3 (x 130).

а, б – левая сторона от шва. в, г – правая сторона шва.

а, в – до аустенизации; б, г – после.

Измерения показали, что:

- аустенизация сварных соединений практически полностью устраняет сенсбилизацию основного металла и металла околошовной зоны, значения степени сенсбилизации после проведения термической обработки становятся практически близкими к  $K_{ПДР}=0\%$  по всему сечению трубопровода в зоне нагрева.

- по результатам измерений степени сенсбилизации, проведенных на наружной поверхности сварных соединений, т.е. неразрушающим способом, до и после проведения аустенизации, можно оценить уровень снижения сенсбилизации металла на внутренней поверхности сварных соединений, и, соответственно, оценить эффективность проведенной термообработки.

Проведенные испытания головного образца индукционной установки для термической обработки сварных соединений макетов доньшек РГК показали:

- с применением внесенных изменений в РД ЭО 0411-02 и разработанной Методики № 1.3.3.99.0034-2009, а также оборудования для оценки степени сенсбилизации, подтверждена эффективность технологии ВТТО сварных соединений трубопроводов с использованием индукционного нагрева;

- установлена температура  $T=1050^{\circ}\text{C}$  и длительность термической обработки  $\tau = 60$  мин., гарантирующая устранение сенсбилизации основного металла и металла сварного шва в зоне индуктора до безопасного уровня, с точки зрения проявления склонности к растрескиванию;

- созданная установка индукционного нагрева обеспечивает рекомендованные параметры с высокой точностью и в автоматическом режиме.

В 2006 году на Ленинградской АЭС была завершена аустенизация сварных соединений приварки донышек РГК нижних водяных коммуникаций первого и второго блоков. В период с 2008 г. по 2013 г. были термообработаны сварные соединения третьего и четвертого блоков Ленинградской АЭС.

Оценка качества проведенных работ по термической обработке сварных соединений приварки донышек раздаточно-групповых коллекторов энергоблоков №№ 1-4 Ленинградской АЭС была проведена с применением диагностического комплекса «САХС» по снижению степени сенсбилизации до и после аустенизации.

Пример распределения степени сенсбилизации металла сварных соединений донышек РГК энергоблоков Ленинградской АЭС в исходном состоянии и после термической обработки представлен на рисунке 14.

На всех исследованных сварных соединениях установлено снижение уровней сенсбилизации металла сварных соединений после проведения аустенизации до значений, безопасных с точки зрения проявления склонности к растрескиванию.

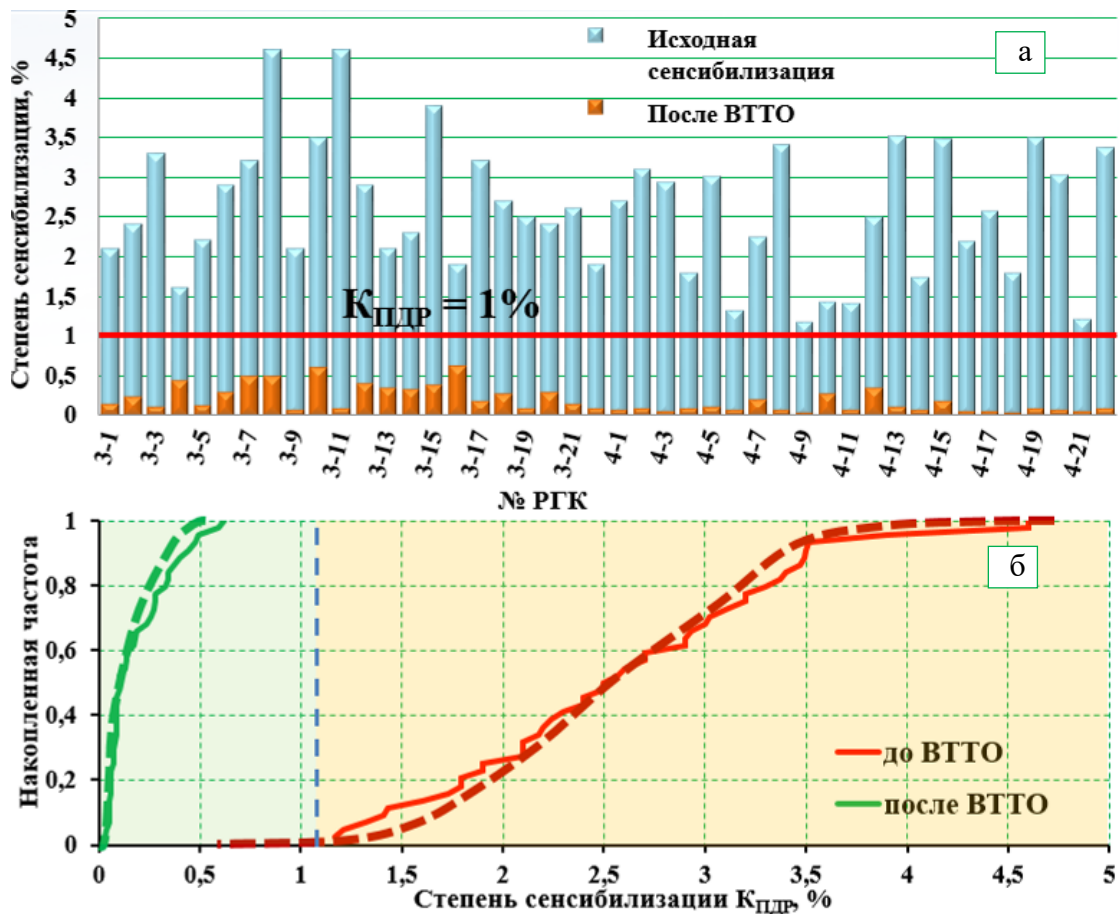


Рисунок 14 – Распределение (а) и накопленная частота (б) степени сенсбилизации металла сварного соединения до и после проведения ВТТО на РГК №№1-44 энергоблока № 2 ЛАЭС

При проведении эксплуатационного ультразвукового контроля сварных соединений донышек РГК Ленинградской АЭС в период с 2008 г. по 2016 г. установлено отсутствие подраста и образования новых дефектов на сварных соединениях, подвергшихся высокотемпературной термической обработке.

## Выводы.

1. Проведенный анализ эксплуатационных повреждений трубопроводов из стали марки 08X18H10T энергоблоков одноконтурных АЭС с водным теплоносителем показал, что одним из основных механизмов повреждений трубопроводов является межкристаллитное растрескивание под напряжением, к которому могут быть склонны сварные соединения трубопроводов Ду300 РБМК-1000. Установлено, что основными факторами, определяющими образование и развитие таких повреждений, являются: сенсibilизация металла околошовной зоны сварных соединений трубопроводов, наличие рабочих и остаточных растягивающих напряжений в зоне корня шва сварного соединения, а также воздействие среды теплоносителя.

2. Исследованы возможности практического использования метода потенциодинамической реактивации для оценки стойкости против коррозионного растрескивания непосредственно на оборудовании и трубопроводах АЭС, установлены основные факторы, ограничивающие его применение:

- отсутствие мобильных технических средств оценки степени сенсibilизации;
- несовершенство нормативной базы по применению метода в производственных условиях.

3. На базе исследований локальных зон сенсibilизации металла разработан, сертифицирован как средство измерения и внедрен диагностический комплекс «САХС» для оценки степени сенсibilизации и склонности к растрескиванию стали марки 08X18H10T методом ПДР.

4. С использованием разработанного диагностического комплекса был установлен режим термической обработки и определена методика подготовки, обеспечивающая равномерный уровень требуемых степеней сенсibilизации по рабочей части испытательного образца. Разработана технология и изготовлены образцы-эталонные из стали 08X18H10T с заданными степенями сенсibilизации.

5. Проведены исследования образцов с различными степенями сенсibilизации при нагружении с постоянной скоростью деформирования и получены зависимости по влиянию сенсibilизации на механические свойства металла околошовной зоны сварных соединений аустенитных трубопроводов в среде теплоносителя РБМК. Определено пороговое значение степени сенсibilизации металла околошовной зоны  $K_{ПДР} = 3\%$ , ниже которого отсутствует влияние сенсibilизации на механические характеристики прочности и пластичности металла.

6. При определении порога склонности сварных соединений к МКР при механических испытаниях образцов с постоянной скоростью деформирования в среде теплоносителя введен коэффициент запаса, учитывающий масштабный фактор и реальную шероховатость поверхности образцов. Обосновано критическое значение степени сенсibilизации проявления склонности металла ОШЗ сварного соединения к межкристаллитному растрескиванию  $[K_{ПДР}] = 1 \%$ .

7. С помощью разработанного диагностического комплекса «САХС» по результатам измерений степени сенсibilизации металла околошовной зоны сварных соединений с реальными дефектами, развивающимися по механизму МКР, получены фактические данные по распределению степени сенсibilизации вдоль



линии сплавления сварных швов трубопроводов Ду300 из стали марки 08X18H10T. Определены зоны повышенной и равномерной сенсбилизации металла ОШЗ сварного соединения.

8. Установлены зависимости скорости роста трещины по механизму межкристаллитного растрескивания от степени сенсбилизации металла и с учетом особенностей ее распределения вдоль линии сплавления сварного соединения трубопроводов из стали 08X18H10T. Для сильно сенсбилизированных участков ОШЗ сварного соединения ( $K_{ПДР} = 6 \div 15 \%$ ) максимальная оценка скорости роста трещины составила  $\dot{a}_{\max} = 4,3$  мм/год, для слабо сенсбилизированных участков ( $K_{ПДР} = 1 \div 6 \%$ )  $\dot{a}_{\max} = 1,1$  мм/год.

9. Определена допустимая скорость роста трещины, при которой гарантировано, по результатам расчета, обеспечение герметичности и прочности сварных соединений трубопроводов на межконтрольный период. При развитии трещины от 0 до 3 мм от внутренней поверхности сварного соединения допустимая скорость  $[\dot{a}] = 1,6$  мм/год, а при развитии трещины от 3 мм и более  $[\dot{a}] = 1,1$  мм/год.

10. Проведены исследования по оценке зависимости результатов измерений степени сенсбилизации образцов-эталонов из стали 08X18H10T от температуры проведения испытаний по методу ПДР и получены линейные корреляционные зависимости результатов измерений степени сенсбилизации образцов-эталонов от температуры измерений.

11. На основе полученных данных по влиянию температуры испытаний на результаты измерений степени сенсбилизации разработана и введена в действие Методика №1.3.3.99.0034-2009, которая применяется как неразрушающий метод эксплуатационного контроля.

12. Использование количественной оценки степени сенсбилизации по разработанной «Методике...» № 1.3.3.99.0034-2009 позволило определить оптимальную температуру  $T = 1050^{\circ}\text{C}$  и длительность термической обработки  $t = 60$  мин сварных соединений Ду300, гарантирующие по окончании термической обработки в зоне расположения индуктора практически полное растворение карбидов хрома и восстановление концентрации хрома по границам аустенитных зерен металла даже при высоком уровне сенсбилизации в исходном состоянии основного металла и металла околошовной зоны.

13. По результатам измерений степени сенсбилизации с применением метода ПДР, проведенных на наружной поверхности сварных соединений до и после выполнения аустенизации, установлен уровень снижения сенсбилизации металла околошовной зоны на внутренней поверхности, и, таким образом, обоснована эффективность проведенной термообработки.

14. Оборудование и разработанная технология ВТТО рекомендованы к опытному применению на Ленинградской АЭС. Для ее проведения разработаны и введены в действие следующие документы:

- «Технологическая инструкция. Техническое обслуживание энергоблоков АЭС с реакторами РБМК установкой высокотемпературной индукционной термообработки для аустенизации сварных соединений узла приварки доньшек РГК», РД ЭО 0527-2004;

- «Рабочая инструкция для определения степени сенсibilизации методом ПДР основного металла на наружной поверхности трубопроводов Ду300 в зоне приварки донышек РГК и Ду55 в производственных условиях», № РИ 60/6115-2006.

15. Выполнена аустенизация сварных соединений донышек раздаточно-групповых коллекторов энергоблоков №№ 1-4 Ленинградской АЭС; прямыми измерениями степени сенсibilизации основного металла на наружной поверхности трубопроводов в зоне термического влияния сварного шва, выполненными до и после аустенизации, подтверждена ее эффективность.

16. Эксплуатационным ультразвуковым контролем сварных соединений донышек РГК Ленинградской АЭС в период с 2008 г. по 2016 г. установлено отсутствие подраста и образования новых дефектов на сварных соединениях, подвергшихся аустенизации.

**Основные результаты диссертационных исследований отражены в следующих научных трудах:**

1. «Комплексные исследования повреждений теплообменных трубок парогенераторов ПГВ-1000М 1-ого блока ЮУАЭС», Васильев Н.В. **Вопросы материаловедения, 2002, № 2 (30), стр. 21-27.**

2. «Меры по предотвращению коррозионных трещин в сварных соединениях трубопроводов АЭС канального типа». Васильев Н.В., Карзов Г.П., Блюмин А.А., Боркин П.И., Степанов Ю.В. и др. **Вопросы материаловедения, 2007, № 3 (51), с. 204-207.**

3. «Опыт проведения высокотемпературной термической обработки сварных соединений трубопроводов из коррозионностойкой аустенитной стали на энергоблоках Ленинградской АЭС». Васильев Н.В., Карзов Г.П., Блюмин А.А., Шалыгин А.С., Боркин П.И. **Вопросы материаловедения, 2015, № 4 (84), с. 130-137.**

4. «Исследование сенсibilизации околошовной зоны сварных соединений для подтверждения эффективности высокотемпературной термообработки аустенитных трубопроводов Ду300 АЭС с реакторами РБМК-1000». Васильев Н.В., Карзов Г.П., Блюмин А.А., Боркин П.И., Зуева М.И. **Вопросы материаловедения, 2016, № 1 (85), с. 99-107.**

5. «Методические и экспериментальные особенности эксплуатационного периодического контроля механических свойств металла трубопроводов энергоблоков с РУ ВВЭР-1000». Васильев Н.В., Османов Э., Петров В.А., Рогожкин В.В., Сапёлкина Ю.В. Вопросы атомной науки и техники. Харьков, Украина. 2002, №4 Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (82), с.146-148.

6. «Разработка принципов практического использования электрохимического метода потенциодинамической реактивации для оценки степени сенсibilизации металла сварных соединений аустенитных трубопроводов». Васильев Н.В., Степанов Ю.В., Туркбоев А., Зуева М.И., Гурьев П.В. Сборник трудов конференции молодых специалистов ЦНИИ КМ «Прометей», 2003 г. с. 121-128.

7. «Опыт аустенизации сварных соединений трубопроводов из аустенитной стали на энергоблоках Ленинградской АЭС». Васильев Н.В., Блюмин А.А., Боркин П.И., Степанов Ю.В., Зуева М.И. и др. Всего 10 чел. «Проблемы материаловедения

при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС» Сборник трудов девятой международной конференции, Санкт-Петербург, 6-8 Июня 2006, CD.

8. «Оценка коррозионной стойкости нержавеющей стали в эксплуатационных условиях», Васильев Н.В., Блюмин А.А., Боркин П.И., Степанов Ю.В. «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС» Сборник трудов девятой международной конференции, Санкт-Петербург, 6-8 Июня 2006, CD.

9. «Роль низкотемпературной коррозии в повреждаемости теплообменных труб парогенераторов типа ПГВ. Зарождение питтингов и развитие трещин КР в среде питтингов в стояночных, предпусковых и пусковых режимах эксплуатации». Васильев Н.В., Карзов Г.П., Блюмин А.А., Суворов С.А. и др. Всего 6 чел. – Сборник трудов десятой международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС». Санкт-Петербург, 7-9 Октября 2008, с. 175-188.

10. «Оценка коррозионной стойкости нержавеющей стали в эксплуатационных условиях». Васильев Н.В., Блюмин А.А., Боркин П.И., Степанов Ю.В., Сборник тезисов девятой международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС». Санкт-Петербург, 6-8 Июня 2006, Стр. 120.

11. «Опыт аустенизации сварных соединений трубопроводов из аустенитной стали на энергоблоках Ленинградской АЭС». Васильев Н.В., Блюмин А.А., Боркин П.И., Степанов Ю.В., Шалыгин А.С. и др. Всего 10 чел. Сборник тезисов девятой международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС». Санкт-Петербург, 6-8 Июня 2006, Стр. 121.

12. «Метод борьбы с коррозионными трещинами в сварных соединениях трубопроводов АЭС канального типа». Васильев Н.В., Карзов Г.П., Блюмин А.А., Боркин П.И., Степанов Ю.В., и др. Всего 7 чел. Сборник тезисов докладов научно-практической конференции «Прочность и долговечность сварных конструкций в тепловой и атомной энергетике» Санкт-Петербург, 25-27 сентября 2007 г. с. 49.

13. «Разработка и совершенствование методов и средств неразрушающего эксплуатационного контроля сенсibilизации трубопроводов АЭС канального типа». Васильев Н.В., Блюмин А.А., Боркин П.И., Степанов Ю.В., Зуева М.И. и др. Всего 6 чел. Сборник тезисов докладов десятой международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС». Санкт-Петербург, 7-9 Октября 2008, с. 100-101.

14. «Роль низкотемпературной коррозии в повреждаемости теплообменных труб парогенераторов типа ПГВ. Зарождение питтингов и развитие трещин КР в среде питтингов в стояночных, предпусковых и пусковых режимах эксплуатации». Васильев Н.В., Карзов Г.П., Блюмин А.А., Суворов С.А. и др. Всего 6 чел. – Сборник тезисов докладов десятой международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС». Санкт-Петербург, 7-9 Октября 2008, с. 116.

Подписано в печать 2018 г. Формат 60x48 1/16.

Печать – офсетная. Усл. п. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1.05.

Тираж 90 экз. Заказ № X/XXX

Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ  
«Прометей»

191015, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, дом 49

Лицензия на полиграфическую деятельность

Лр № 020644 от 13 октября 1997