



РОСЭНЕРГОАТОМ

ВНИИАЭС

Акционерное общество «Всероссийский
научно-исследовательский институт по
эксплуатации атомных электростанций»
(АО «ВНИИАЭС»)

ул. Ферганская, д. 25, г. Москва, 109507,
тел.: (499)796-91-33, факс: (495)376-83-33
www.vniiaes.ru, e-mail: vniiaes@vniiaes.ru

№ _____

На № _____ от _____

НИЦ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей»		
доу	Вх. № 1043	в ДЕЛО
	«30» 03 20 18 г.	№ _____
	Осн. _____ л.	подп. _____
	Прил. _____ л.	

Отзыв официального оппонента

**на диссертационную работу ВАСИЛЬЕВА Николая Валерьевича
«Разработка и совершенствование методов и средств неразрушающего
эксплуатационного контроля степени сенсibilизации металла сварных
соединений трубопроводов АЭС из стали 08X18H10T»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.09 - материаловедение (машиностроение)

Диссертационная работа Н.В. Васильева посвящена актуальной теме: разработке и внедрению новых количественных методов оценки низких уровней сенсibilизации и возможности ее определения как в лабораторных, так и в производственных условиях на самом изделии неразрушающим способом, формулировке критериев и разработке процедур внедрения метода оценки уровня сенсibilизации сталей аустенитного класса, позволяющих проводить контроль оборудования и трубопроводов при эксплуатации, а также оценивать качество сварных соединений трубопроводов, находящихся в эксплуатации. Диссертационная работа направлена на решение важной научно-технической задачи – обеспечение ресурса трубопроводов контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) РУ РБМК-1000 при продлении их срока службы до 45 лет.

Диссертация состоит из 4 глав и 3 приложений.

В первой главе дан обзор современной научно-технической литературы, Проведен анализ опыта эксплуатации трубопроводов зарубежных АЭС, выполненных из сталей типа AISI321, а также РУ РБМК с трубопроводами из коррозионностойких аустенитных сталей. При этом выявлено, что основным механизмом повреждения трубопроводов, является межкристаллитное

коррозионное растрескивание под напряжением (МКРПН) сварных соединений трубопроводов из стали марки 08Х18Н10Т. При этом выявлены основные факторы, определяющие склонность сварных соединений трубопроводов Ду300 КМПЦ РУ РБМК-1000 к МКРПН:

- сенсibilизация металла околошовной зоны (ОШЗ) выше критических значений;
- превышение содержание кислорода в теплоносителе до концентраций $[O_2] \geq 0,1$ мг/кг;
- наличие остаточных и рабочих растягивающих напряжений в зоне корня шва порядка предела текучести $\sigma_{0,2}$.

Проведенный анализ электрохимических и металлографических методов оценки сенсibilизации аустенитных сталей показал, что наиболее полно для оценки количественных значений степени сенсibilизации можно применить метод потенциодинамической реактивации (ПДР). Показано, что главным фактором, препятствующим применения метода ПДР, является отсутствие эффективных приборных средств.

Во второй главе сформулированы основные требования к разрабатываемому диагностическому комплексу для оценки степени сенсibilизации в районе сварных швов сталей аустенитного класса методом ПДР. В ней систематизированы результаты проведенных исследований по влиянию сенсibilизации на механические характеристики металла сварных соединений аустенитных трубопроводов и дана оценка скорости подраста трещины МКРПН в металле ОШЗ сварного соединения трубопровода Ду300 КМПЦ. Дано описание разработки портативного диагностического комплекса «САХС», позволяющего проводить испытания по оценке склонности аустенитных нержавеющей сталей к МКК и МКРПН. Описаны работы, проведенные на Ленинградскую АЭС, по приемочным испытаниям и внедрению указанного комплекса.

Приведены данные о метрологической аттестации портативного диагностического комплекса «САХС» и внесении его в Государственный Реестр средств измерений под регистрационным номером № 29464-05, а также о получении сертификата об утверждении типа средства измерения «САХС».

С помощью диагностического комплекса «САХС» проведены исследования образцов с различной степенью сенсibilизации и проведен ряд коррозионно-механических испытаний металла трубопроводов Ду300 в воде высоких

параметров состава КМПЦ, а также на воздухе, в том числе при нагружении с постоянной скоростью деформирования (ПСД),

Выполнены исследования фактического распределения степени сенсibilизации вдоль линии сплавления сварных швов на вырезанных фрагментах трубопроводов Ду300 Ленинградской АЭС, содержащих реальные дефекты различной глубины и протяженности, отбракованные в разное время на энергоблоках №№ 1-4 (всего 24 соединения с обеих сторон от сварного шва). Выполненные исследования показали, что зона с наибольшей степенью сенсibilизации имеет протяженность порядка 3 мм в районе корня шва вдоль линии сплавления от внутренней к наружной поверхности. В указанной зоне максимальная величина КПДР может достигать 10% и более. При этом далее вдоль линии сплавления на расстоянии свыше 3 мм от корня шва величина КПДР составляет не более 5%. Результаты данных исследований показывают, что появление и максимально быстрый рост трещин, развивающихся по механизму МКРПН, можно ожидать в зоне на расстоянии от 0 до 3 мм на внутренней поверхности трубопровода. В этой зоне скорость ста трещины может достигать 4,3 мм/год в режиме пуска блока и 1,6 мм/год в режиме нормальной эксплуатации.

На расстоянии свыше 3 мм рекомендуется принимать среднюю скорость трещины 1,1 мм/год.

Методика оценки сенсibilизации и стойкости сталей типа X18H10T против МКРПН в производственных условиях разработана в третьей главе. Необходимость этой разработки обусловлена тем, что величина степени сенсibilизации при определении ее методом ПДР зависит от температуры помещения, в котором проводят измерения. Поскольку при проведении ВТТО в производственных помещениях АЭС не удастся обеспечить стандартную температуру (25 ± 1 С), при которой должны проводиться измерения, результаты измерений в этом случае должны пересчитываться с учетом поправки на фактическую температуру измерений.

Эталонные образцы для внесения температурных поправок при отклонениях от нормированных температур испытаний выбраны исходя из известных критических значений в соответствии с ГОСТ 9.914-91 и РД ЭО 0411-02 и изготовлены из стали марки 08X18H10T.

В качестве материала для изготовления образцов использовали трубопровод Ду300 из стали марки 08X18H10T. В исходном состоянии трубопровод Ду300 имел аустенитную структуру металла с баллом зерна 6.

Трещины в сварных соединениях зарождаются в корне шва и развиваются в околошовной зоне, поэтому была проведена имитация процесса наложения первого валика при выполнении сварного соединения. Заготовки подвергались электронагреву на температуру 1200°С и выдерживались в течении 3-х секунд с последующим охлаждением в воде. При данной термообработке происходил рост зерна аустенита (от 6 балла до 3-4) и частичное растворение карбидов титана.

Для получения заданного уровня сенсibilизации заготовки подвергали сенсibilизирующему отжигу на 12 партиях по 4 заготовки с различным временем выдержки при провоцирующей температуре. После сенсibilизирующего отжига из заготовок изготавливали образцы с равной площадью рабочей поверхности $S=0,5 \text{ см}^2$.

Электрохимические исследования проводились с помощью диагностического прибора «САХС». Температура испытаний поддерживалась равной $25\pm 1^\circ\text{C}$. На каждом образце – эталоне проводили не менее десяти измерений степени сенсibilизации.

Для подтверждения полученных значений степени сенсibilизации на образцах-эталонах, склонных и не склонных к межкристаллитной коррозии, были проведены испытания на стойкость против МКК.

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

Указанные зависимости позволили применять указанный метод на АЭС и оформить «Методику оценки склонности к межкристаллитному коррозионному растрескиванию сварных соединений трубопроводов КМПЦ реакторов РБМК на основе метода потенциодинамической реактивации», № 1.3.3.99.0034-2009.

Для снижения склонности сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 КМПЦ РУ РБМК к МКРПН разработана технология ВТТО - высокотемпературной термической обработки (глава четвертая).

В диссертации приведены результаты экспериментальных работ по верификации и внедрению технологии ВТТО сварных соединений приварки доннышек раздаточно-групповых коллекторов (РГК) трубопроводов Ду300 КМПЦ реактора РБМК-1000.

На всех исследованных сварных соединениях Ленинградской АЭС установлено снижение уровней сенсibilизации металла сварных соединений после проведения ВТТО до значений, безопасных с точки зрения проявления склонности к МКРПН.

При проведении последующего эксплуатационного контроля сварных соединений приварки донышек РГК энергоблоков №№ 1-4 Ленинградской АЭС с помощью методик УЗ-контроля в период с 2008 г. по 2014 г. установлено отсутствие подроста и образования новых дефектов на сварных соединениях, подвергшихся высокотемпературной термической обработке индукционным нагревом до температуры $T=1050^{\circ}\text{C}$ с выдержкой в течение 60 минут.

Научная новизна.

Установлены граничные условия и зависимости, определяющие влияние степени сенсibilизации на изменение механических характеристик прочности и пластичности основного металла и металла сварных соединений стали марки 08X18H10T для трубопроводов Ду300 КМПЦ РУ РБМК-1000 при нагружении в среде теплоносителя с различной скоростью деформирования при определении склонности к МКРПН.

На основании полученного объема металлографических и электрохимических исследований эксплуатационных коррозионных повреждений сварных соединений трубопроводов КМПЦ установлена линейная корреляционная связь скорости роста трещины, развивающейся по механизму МКРПН, от уровня сенсibilизации и характера ее распределения вдоль линии сплавления сварного соединения.

С использованием созданных образцов-эталонов из стали 08X18H10T с заданными степенями сенсibilизации определены зависимости результатов измерений степени сенсibilизации от температуры проведения испытаний по методу ПДР.

Построены линейные корреляционные зависимости значений степени сенсibilизации, измеренных при различных температурах, на стандартную температуру. Определены коэффициенты линейной зависимости корректировки

результатов измерений при внесении температурных поправок, построены температурные зависимости коэффициентов.

Практическая значимость работы.

Разработан, сертифицирован и внедрен диагностический комплекс «САХС» для оценки степени сенсibilизации и склонности к МКК и МКРПН аустенитных хромоникелевых сталей методом ПДР.

Разработана технология производства и изготовлены образцы-эталон из стали 08X18H10T с заданными степенями сенсibilизации. Оформлен стандарт предприятия № СТП УЕИА.246-2007 «Образцы из стали марки 08X18H10T с заданными уровнями сенсibilизации. Процедура аттестации».

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 № 1.3.3.99.0034-2009 эксплуатирующей организации АО «Концерн «Росэнергоатом», позволяющая применять для оценки стойкости против МКРПН основного металла и металла сварных соединений трубопроводов метод ПДР в качестве неразрушающего метода эксплуатационного контроля.

Использование разработанной методики № 1.3.3.99.0034-2009 и диагностического комплекса «САХС» дало возможность подтвердить эффективность технологии ВТТО с использованием индукционного нагрева и обосновать режим термической обработки сварных соединений трубопроводов Ду300 КМПЦ РУ РБМК.

Для проведения ВТТО сварных соединений приварки донышек РГК КМПЦ 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 сварных соединений узла приварки донышек 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.

Выполнены работы по ВТТО металла сварных соединений приварки донышек РГК трубопроводов Ду300 КМПЦ энергоблоков №№ 1-4 Ленинградской АЭС.

В приложениях А, Б и В приведены документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы, включая сертификат на об утверждении типа средств измерений преобразователей «САХС», Акт приемки передачи прибора для определения степени сенсibilизации металла «САХС» и Акт внедрения результатов диссертации.

К работе имеются замечания.

1. Трубопроводы Ду300 имеют существенные изгибающие моменты, изгибные напряжения в ряде случаев соизмеримы с напряжениями от рабочего внутреннего давления. Желательно было бы проследить, как идет процесс МКРПН, когда напряжения от давления уменьшаются, и когда они увеличиваются из-за изгиба.
2. Скорость роста трещин, установленная в работе (1,1 мм в год и более), представляется несколько завышенной, так как даже по приведенным автором в диссертации данным, на опускных трубопроводах после 19 – 24 лет эксплуатации дефектов рентгеновским методом контроля выявлено не было (страница 19).
3. В работе убедительно показано, что ВТТО положительно влияет на состояние сварных швов (ОШЗ), однако возможность применения этой технологии для трубопроводов Ду300 в работе не обсуждена.
4. В работе утверждается, что уровень напряжений в корне шва близок к пределу текучести, однако надо иметь ввиду, что после гидравлических испытаний на прочность уровень остаточных напряжений существенно снижается.

Сделанные замечания не снижают ценности диссертационной работы.

Работа логична, в целом хорошо оформлена, содержит большое число иллюстраций, написана хорошим научным языком.

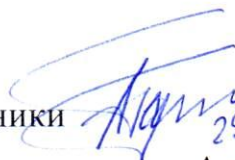
Все основные результаты опубликованы в 14 статьях и докладах.

Автореферат и публикации отражают содержание диссертации.

Работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Васильев Николай Валерьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 «Материаловедение (машиностроение)».

Доктор технических наук, профессор,

лауреат премии СМ СССР в области науки и техники

 29.03.2018.

Гетман

Александр Федорович

Телефон 8-495-3761322

Эл. адрес: AFGetman@vniiaes.ru

Подпись Гетмана А.Ф.

Удостоверяю:

Начальник отдела кадров АО «ВНИИАЭС»





О.И.Попова