



**ТРУБОПРОВОДЫ –
КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА**

**PIPELINES – CORROSION AND
PROTECTION**

Тип статьи: научная, оригинальная

Article type: original

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.114.4-4>

**Инновационный подход к противокоррозионной защите
трубопроводных конструкций из нержавеющей стали на АЭС**

С.И. Бойко[✉], Н.В. Мамоненко

НИКИМТ-АТОМСТРОЙ РОСАТОМ,
РФ, 127410, г. Москва, Алтуфьевское шоссе, д. 43

e-mail: BoykoSI@atomrus.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы опасного коррозионного разрушения нержавеющей стали, являющихся основным конструкционным материалом атомных электростанций. Описаны применяемые способы защиты от локальной коррозии и коррозионного растрескивания. Авторами предложен способ защиты от коррозии наложением переменного тока на участки трубопровода, разделенные электроизолирующей вставкой. Кратко изложена теория, описывающая влияние слабого переменного тока на кинетику коррозионного процесса стального трубопровода. Представленный инновационный подход к вопросу защиты от коррозии технологических металлических трубопроводов будет интересен специалистам предприятий и организаций, связанных с вопросами коррозионного растрескивания нержавеющей стали и хромоникелевых сплавов для выявления путей защиты от него конструкций атомных электростанций.

Ключевые слова: коррозия, катодная защита, поляризация, переменный ток, гальванические пары, нержавеющая сталь, коррозионное растрескивание, вставка электроизолирующая

Для цитирования: Бойко С.И., Мамоненко Н.В. Инновационный подход к противокоррозионной защите трубопроводных конструкций из нержавеющей стали на АЭС // Практика противокоррозионной защиты. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 41-46. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.114.4-4>

Статья получена 02.10.2024. Принята к публикации 18.11.2024. Опубликовано 01.12.2024.

**An Innovative Approach to Anticorrosive Protection of Stainless-steel
Pipeline Structures at Nuclear Power Plants**

Sergey I. Boyko[✉], Natalia V. Mamonenko

Research and design Institute of Installation Technology,
43, Altuf'yevskoe highway, Moscow, 127410, Russian Federation

e-mail: BoykoSI@atomrus.ru

Abstract. The article discusses the issues of dangerous corrosion destruction of stainless steels, which are the main structural material of nuclear power plants. The applied methods of protection against local corrosion and corrosion cracking are described. The authors have proposed a method of corrosion protection by applying alternating current to sections of a pipeline separated by an electrically insulating insert. A theory describing the effect of weak alternating current on the kinetics of the corrosion process of a steel pipeline is briefly presented. The presented innovative approach to the issue of corrosion protection of technological metal pipelines will be of interest to specialists of enterprises and organizations related to the issues of corrosion cracking of stainless steels and nickel alloys to identify ways to protect structures of nuclear power plants from it.

Keywords: corrosion, cathodic protection, polarization, alternating current, galvanic couples, stainless steel, corrosion cracking, electrical insulating insert

For citation: Boyko, S. I., Mamonenko, N. V. (2024). An Innovative to Anticorrosive of Stainless-steel Pipeline Structures at Nuclear Power Plants. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29(4), 41-46. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.114.4-4>

Received October 02, 2024. Accepted for publication November 18, 2024. Published December 12, 2024.

Введение

Коррозионные проблемы в большинстве случаев рассматриваются не в общем виде, а применительно к металлам, для которых они наиболее характерны или технически важны. Так, атмосферная, биогенная и почвенная коррозия разбираются на примере углеродистых сталей, закономерности питтинговой и межкристаллитной коррозии, а также коррозионного растрескивания – на примере нержавеющих сталей.

Нержавеющие стали (НС) являются основным конструкционным материалом АЭС. Из них изготавливают трубопроводы, трубы и корпуса насосов, фильтров, парогенераторов (ПГ) и теплообменников, оболочки твэлов, плакировку корпусов реакторов, механизмы регулирующих, исполнительных и контролирующих систем, внутриреакторные детали, арматуру и т.д. Причина широкого использования НС в водоохлаждаемых реакторах – высокая устойчивость против равномерной (сплошной) коррозии.

Одним из немногих, но часто весьма важным недостатком нержавеющих хромоникелевых аустенитных сталей (АНС) является склонность их к межкристаллитной коррозии (МКК). При этом межкристаллитному разрушению эти стали подвергаются далеко не всегда, а только при определенных сочетаниях внешних и внутренних факторов, то есть химического и фазового состава металла и характера коррозионной среды. Известно, что, как правило, МКК АНС обнаруживается после выдержки стали в температурной зоне 400...800 °С. Вероятность локальной коррозии возрастает на участках конструкций, где накапливаются агрессивные примеси, обычно хлориды, содержащиеся в подпиточной и охлаждающей воде естественных источников (реки, озера, моря). Кроме того, в воду могут проникать соединения хлора и серы из масел, смазок, растворителей и т.д., а также сульфиды, фториды. Накопление наблюдается вблизи границы раздела водной и паровой фаз, в щелевых и застойных зонах, на теплопередающих поверхностях, под слоем отложений и т.д. Так как реальные конструкции атомных электростанций (АЭС) практически всегда несут рабочие или остаточные нагрузки, на этих участках наблюдается коррозионное растрескивание (КР). Трещины при КР проникают в глубь металла и нарушают герметичность конструкции намного быстрее, чем

остальные виды локальной коррозии. Поэтому подавляющее большинство (80...90%) описанных в литературе случаев преждевременного выхода из строя реакторных конструкций из НС по коррозионной причине связано с КР транскристаллитного или межкристаллитного характера (ТКР или МКР).

Коррозионное растрескивание НС интенсивно исследуется более 60 лет. Прodelана огромная работа по выявлению механизма КР, однако до сих пор нет общепринятой теории, объясняющей экспериментальные факты. Это связано со сложностью явлений при КР, протекающих в субмикро- и микрообъемах при затрудненном массообмене и сложном сочетании механических, электромеханических, химических, адсорбционных и диффузионных процессов. Так как напряжение на поверхности концентрируется в области дефекта, там и происходит быстрый рост трещин. Поверхностные дефекты действуют как эффективные концентраторы. Не вдаваясь в подробности фундаментальных научных гипотез механизмов КР АНС (транскристаллитного и межкристаллитного), остановимся на основном выводе: практически ни одна из гипотез, объясняющих КР АНС, не обходится без учета электрохимической стадии. Существует фундаментальный факт сильного влияния электродного потенциала на КР АНС. Например, при хлоридном ТКР катодная поляризация предотвращает образование новых и останавливает развитие уже начавшихся трещин. В пользу чисто электрохимического механизма говорят электронно-акустические измерения (нет хрупких «шумов») и точные измерения удлинения образцов при КР (нет скачков удлинения). Согласно электрохимической гипотезе, на стадии развития трещины концентрация напряжений перед острием зародыша или развивающийся трещины вызывает быструю локальную пластическую деформацию металла. Благодаря этому, в острие трещины настолько усиливается анодное растворение металла (по сравнению с ненапряженными боковыми стенками), что трещина распространяется в глубь со скоростью до 0,5...2,5 мм/ч (эквивалентная анодная плотность тока 0,4...2,0 А/см²).

Стенки трещины или находятся в пассивном состоянии (и ведут себя как катод или почти абсолютно поляризуемый анод), или очень медленно корродируют в активном состоянии

(участки около острия трещины) при контроле процесса скоростью растворения никеля. Катодом коррозионной ячейки является пассивная поверхность металла, катодным деполяризатором – растворенный кислород или H^+ (H_3O^+) (рис. 1) [1].

Согласно электрохимической теории МКК АНС наступает тогда, когда окислительно-восстановительный потенциал раствора (а следовательно, и сообщаемый объекту коррозии общий стационарный потенциал) лежит положительнее активно корродирующей границы, но отрицательнее потенциала поверхности зерна, находящейся в пассивном состоянии. При этом создаются такие условия, когда прилегающая к границе зерна область твердого раствора, обедненная хромом, все время остается активной и устойчиво работает анодом, а поверхность самого зерна остается пассивной и устойчиво работает катодом.

Из вышеизложенного следует, что среди основных способов защиты от КР Fe-Cr-Ni материалов АЭС: выбор материала и усовершенствование состава НС; уменьшение механических нагрузок; снижение агрессивности теплоносителя; электрохимическая (в том числе протекторная) защита, защитные покрытия. Электрохимическая защита (ЭХЗ), при технической возможности ее реализации, могла бы универсально влиять на коррозионный процесс, например, трубопроводных участков конструкций из нержавеющей сталей на АЭС,

в малой зависимости от материала и агрессивности теплоносителя. Однако, кроме технических проблем применения электрических методов защиты, очевидно также, что эффективность ЭХЗ в значительной мере зависит от защитных покрытий защищаемых конструкций, прежде всего изоляционных (органических лакокрасочных и полимерных). Область применения изоляционных покрытий ограничена зоной сравнительно низких температур (100 °С) и низким уровнем облучения (1017...1018 нейтр/см²) [1]. Поэтому широкого применения ЭХЗ, как способ защиты от КР изделий из НС в водных теплоносителях АЭС, на сегодняшний день не получила.

Авторы статьи предлагают реализовать инновационный подход к защите от локальной коррозии и коррозионного растрескивания трубопроводных участков конструкций из нержавеющей сталей на АЭС. Известен способ антикоррозионной защиты внутренней и внешней поверхностей металлических трубопроводов наложением переменного тока (Патент РФ на изобретение № 2533467 от 30.11.2012, авторы Бойко Сергей Иванович (RU), Петров Алексей Владимирович (BY)) [2]. Принцип действия защиты способом наложения переменного тока заключается в наложении переменного тока на части защищаемого сооружения, разделенные электроизолирующей вставкой (ВЭИ) (рис. 2).

Период колебаний наложенного переменного тока сравним с характерными временами образования гальванических пар в гетерогенно распределенном ДЭС по поверхности защищаемых участков трубопровода, при специально подобранных параметрах прикладываемого тока, активность и развитие гальванических пар сплошной и локальной электрохимической коррозии подавляется.

Как отмечалось выше, механизм возникновения КР АНС основывается, в частности, на электрохимических стадиях; очевидно, что знакопеременная поляризация участков трубопровода, разделенных ВЭИ будет активно воздействовать на снижение устойчивости катодных и анодных зон ненапряженного, напряженного и деформируемого металла, нивелируя факт сильного влияния электродного потенциала на КР АНС, тем самым снижая анодное растворение металла, препятствуя развитию трещины. Указанным способом реализуется состояние неполной пассивации при

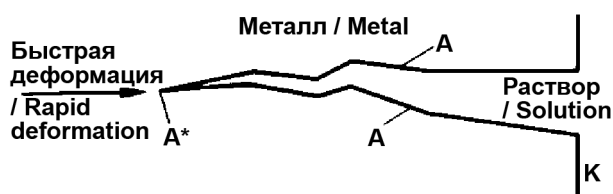


Рис. 1. Схематическое изображение трещины при КР АНС:

К – катод ($1/2 O_2 + H_2O + 2\bar{e} = 2OH^-$);

А – анод ненапряженного металла, плотность тока 10^{-5} А/см²;

А* – анод деформируемого металла, плотность тока 0,5 А/см²

Fig. 1. Schematic representation of the crack at the ANS CR:

К – cathode ($1/2 O_2 + H_2O + 2\bar{e} = 2OH^-$);

А – is an anode of an unstressed metal, current density 10^{-5} А/см²;

А* – is the anode of the deformable metal, current density 0.5 А/см²

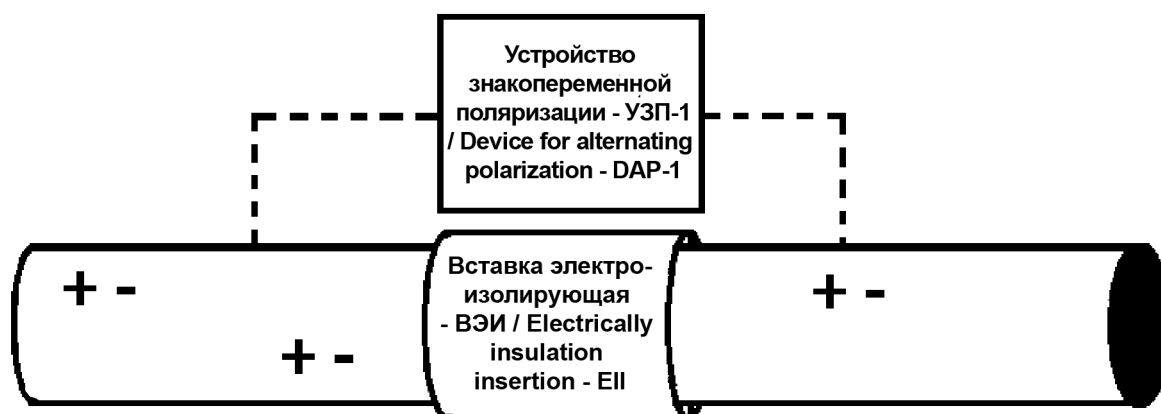


Рис. 2. Принцип действия противокоррозионной защиты способом наложения переменного тока

Fig. 2. The principle of operation of anticorrosive protection by applying alternating current

анодной поляризации и катодная защита со сдвигом потенциала в сторону равновесного защитного потенциала E_p (рис. 3) [3]. Предлагаемый инновационный способ защиты от коррозии наложением переменного тока является универсальным и может защитить внутреннюю и внешнюю стенки трубопроводных систем теплообменного оборудования, дренажных труб, трубопроводы основных и байпасных контуров реакторов и др. Преимущество способа состоит в технологичности и экономичности. Для применения способа не требуется разработка специальных проектно-конструкторских решений, применение вспомогательных жерт-

венных электродов, гальванических анодов, мощных источников постоянного тока, изолирующих защитных покрытий с высокой термостойкостью при сохранении диэлектрических свойств и адгезии. Единственным необходимым и достаточным условием для технического применения способа является установка ВЭИ с соответствующими техническими характеристиками, соответствующими эксплуатационным параметрам и транспортируемому продукту. Реализация способа осуществляется применением разработанного устройства знакопеременной поляризации (УЗП), которое представляет собой генератор переменного тока крайне низких частот с возможностью прецизионного регулирования частоты, амплитуды и скважности сигнала отдельно по поло-

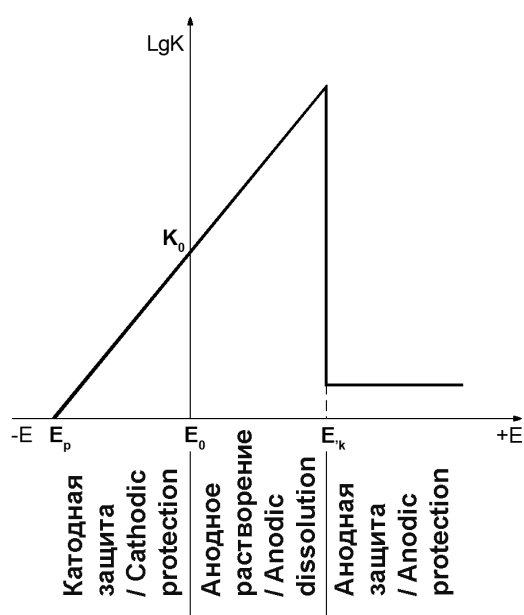


Рис. 3. Поляризационная диаграмма, поясняющая механизм анодной и катодной защиты металлов: E_0 – начальное стационарное значение потенциала, K_0 – скорость коррозии при стационарном потенциале, E_p – равновесный (защитный) потенциал, E'_k – первый критический потенциал, после которого наступает пассивное состояние [3]

Fig. 3. Polarization diagram explaining the mechanism of anodic and cathodic protection of metals: E_0 is the initial stationary value of the potential, C_0 is the rate of corrosion at a stationary potential, E_p is the equilibrium (protective) potential, E'_k is the first critical potential, after which a passive state occurs [3]

жительной и отрицательной полярности. Указанные прецизионные регулировки позволяют практически одинаково поляризовать участки трубопровода, разделенные ВЭИ, независимо от их конструктивных особенностей. На *рис. 4* представлено фото рабочего образца УЗП. В *табл. 1* представлены основные технические характеристики УЗП. Экспериментальные данные, полученные при участии ВНИИНЕФТЕМАШ в химической лаборатории ЦФМК ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, ООО «ЛИДЕР НК» и ООО «Компания «Магистраль-Сервис» подтверждают эффективность способа снижения скорости коррозии при отсутствии изоляционного покрытия и без применения в цепи ЭХЗ жертвенного анода. Положительные результаты лабораторных ускоренных испытаний были получены на образцах-свидетелях коррозии конструкционной низкоуглеродистой стали 20 и нержавеющей сталей 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т по гравиметрическому критерию, критерию потери массы образца, то есть эффективность способа подтверждалась на примере общей и локальной коррозии в *табл. 2* [4].

Настоящая работа посвящена решению проблем коррозионного растрескивания НС транскристаллитного и межкристаллитного характера (ТКР или МКР), применением ин-

новационного способа антикоррозионной защиты внутренней и внешней поверхностей металлических трубопроводов наложением переменного тока, с последующим определением устойчивости металла к коррозионному растрескиванию, изменению пределов прочности металла после выдержки его за одно и то же время в коррозионной среде в напряженном и ненапряженном состоянии, согласно требований [5, 6].



Рис. 4. Рабочий образец УЗП

Fig. 4. Working sample of the USP

Таблица 1. Основные технические характеристики УЗП

Table 1. The main technical characteristics of the UZP

Наименование характеристик	Значение
Напряжение питания / Supply voltage	~220 В (50 Гц) / ~220 V (50 Hz)
Выходное напряжение / Output voltage	1...5 В / 1...5 V
Частотный диапазон выходного тока / Frequency range of output current	0...70 Гц / 0 ... 70 Hz
Выходная мощность УЗП-01 (макс.) / Output power (max)	75 Вт / 75 W
Тип корпуса / Body Type	Кейсовый / Case body type
Габаритные размеры (ДхШхВ) / Overall dimensions (LxWxH)	339×295×152 (мм) / 339×295×152 (mm)
Масса (брутто) / Weight (gross)	5 кг / 5 kg
Рабочий режим устройства / Operating mode of the device	Продолжительный, непрерывный / Continuous

**Таблица 2. Результаты гравиметрических испытаний образцов-свидетелей
(3% водный раствор NaCl, 10 сут, 20 °C) [4]**

**Table 2. The results of gravimetric tests of witness samples
(3% aqueous NaCl solution, 10 days, 20 °C) [4]**

№ образца / № number		Исходная масса m_n , г / The initial mass of m_n , g	Конечная масса m_k , г / Final mass. m_k , g	$\Delta_s = m_n - m_k$, г / $\Delta_s = m_n - m_k$, g	$\Delta \Sigma = \sum \Delta_s$, г	$\Delta = \Delta \Sigma$ (без защи- ты) - $\Delta \Sigma$ (с защитой), г, (%) / $\Delta = \Delta \Sigma$ (Without protection) - $\Delta \Sigma$ (with protection), g, (%)
9	С защитой / With protection	105,696	105,080	0,616	1,268	1,049, (45,27)*
10		107,409	106,757	0,652		
11	Без защиты / Without protection	108,769	107,726	1,043	2,317	
12		108,365	107,091	1,274		

*Примечание. От среднего значения исходной массы образцов № 9-12

Применение инновационного способа антикоррозионной защиты наложением переменного тока позволят увеличить срок службы металлических трубопроводов, снизить стоимость их строительства и обслуживания.

Литература

1. Богоявленский В.Л. Коррозия сталей на АЭС с водным теплоносителем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 167 с.
2. Патент № 2533467 РФ. Способ антикоррозионной защиты внутренней и внешней поверхностей металлических трубопроводов наложением переменного тока / С. И. Бойко, А. В. Петров. Заявл. 30.11.2012, опублик. 20.11.2014.
3. Коррозия и защита металлов. Сборник статей / под редакцией В.П. Батракова. – М.: ГНТИ Оборонгиз, 1962. – 194 с.
4. Бойко С.И., Шумилов С.В. Апробация инновационных методик и устройств для противокоррозионной защиты подземных трубопроводов // Газовая промышленность. – 2020. – № 5. – С. 70-77.
5. Гост 6032–2017. «Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы испытаний на стойкость против межкристаллитной коррозии». Дата введения 01.08.2018.

Информация об авторах

Бойко Сергей Иванович, эксперт по неразрушающему контролю, Научно-исследовательский и проектный институт монтажных технологий, г. Москва, Российская Федерация
Мамоненко Наталия Валерьевна, начальник испытательного центра, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт монтажной техники, г. Москва, Российская Федерация

6. ОСТ 26-2-87 Стали и сплавы на железоникелевой и никелевой основах. Методы испытаний на стойкость против коррозионного растрескивания ОКСТУ 3609. Дата введения 1988-01-01.

References

1. Bogoyavlensky, V. L. (1984). *Corrosion of steels at nuclear power plants with an aqueous coolant*. Moscow: Energoatomizdat. (in Russ.)
2. Boyko, S. I., Petrov, A. V. (2012). Anticorrosive protection method for inner and outer surfaces of metal pipelines by alternating current applying. RU2533467 (Patent). (in Russ.)
3. Batrakov V. P. (Eds.) (1962). *Corrosion and protection of metals*. Collection of articles. Moscow: GNTI Oborongiz. (in Russ.)
4. Boyko, S. I., Shumilov, S. V. (2020). Testing of innovative methods, techniques and devices for corrosion protection of underground pipelines. *Gas industry*, (5), 70-77. (in Russ.)
5. GOST 6032-2017. (01.08.2018). Corrosion-resistant steels and alloys. Test methods of intercrystalline corrosion resistance. (in Russ.)
6. OST 26-2-87. (01.01.1988). Steels and alloys on iron-nickel and nickel bases. Test methods for resistance to corrosion cracking OKSTU 3609. (in Russ.)

Information about authors

Sergey I. Boyko, non-destructive testing expert, Research and design Institute of Installation Technology, Moscow, Russian Federation
Natalia V. Mamonenko, Chief of the Testing Center, Research and design Institute of Installation Technology, Moscow, Russian Federation