

УДК 620.193.25;669.24.621.777

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СКЛОННОСТИ К МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛА ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

© И. А. Сафонов, И. Л. Харина, А. Е. Корнеев¹*Статья поступила 6 ноября 2014 г.*

На основе стандартного метода (регламентированного ГОСТ) разработана методика испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии (МКК) нержавеющей стали — основного материала действующего оборудования АЭС. Методика включает способы подготовки исследуемой поверхности, среды и параметры анодного травления, условия металлографической оценки стойкости к МКК. Достоверность результатов подтверждена данными сравнительных испытаний образцов стали 08Х18Н10Т в аустенизированном и сенсibilизированном состояниях по разработанному и стандартному (АМУ, ГОСТ 6032–2003) методам. Предложенный подход к оценке стойкости к МКК непосредственно при просмотре поверхности имеет существенные преимущества перед методом «реплик». Он использован при исследовании коррозионного состояния поверхности внутрикорпусных элементов насосов ГЦН-195М на блоках Калининской и Балаковской АЭС после 20-летнего периода их эксплуатации.

Ключевые слова: аустенитная нержавеющая сталь; межкристаллитная коррозия; металлографический метод.

Одна из важнейших характеристик коррозионно-стойких (нержавеющих) сталей, необходимая, в частности, для решения вопроса продления ресурса отдельных элементов оборудования блоков АЭС, — отсутствие склонности поверхностных слоев металла к межкристаллитной коррозии (МКК) при длительной (более 20 лет) эксплуатации в коррозионных средах (теплоносителях).

Условия эксплуатации оборудования (суммарная длительность, составы и параметры сред, контактирующих с поверхностью конструкционных материалов оборудования и другие факторы), например, из аустенитной нержавеющей стали (АНС) марки 08Х18Н10Т — основного конструкционного материала элементов оборудования АЭС с водо-водяным теплоносителем (ВВТ) могут вызывать структурные изменения металла, приводящие к склонности к МКК.

Механизм появления склонности АНС к МКК, как правило, обусловлен обеднением приграничных участков зерен аустенита хромом вследствие выпадения карбидов хрома и разной скорости диффузии хрома и углерода к границам зерен [1].

В соответствии с положениями нормативных документов [2] испытания на стойкость к МКК относятся к разрушающим методам контроля и подразумевают необходимость вырезки образцов, что невозможно в случае действующего оборудования АЭС.

Применяемый в настоящее время при металлографическом контроле структурного состояния метод

«реплик» имеет ряд существенных недостатков и в большинстве случаев оказывается малоэффективным. В частности, для получения им четких отпечатков границ зерен металла необходимо интенсивное растворение исследуемой поверхности, что в совокупности с последующей повторной шлифовкой, как правило, приводит к изменению состояния поверхности на площади травления и возможному появлению неблагоприятных факторов, обусловленных воздействием на металл коррозионной среды.

Цель работы — исследование возможности применения локального неразрушающего электрохимического метода оценки стойкости к МКК эксплуатируемого оборудования АЭС.

Предлагаемый подход по оценке элементов непосредственно действующего оборудования основан на принципе испытания, регламентированного стандартом (методом «Б») [3], с соответствующей корректировкой параметров процесса.

В качестве материала опытных образцов использовали сталь 08Х18Н10Т в аустенизированном состоянии после термообработки по режиму: 1050 °С с охлаждением в воду (образцы, не склонные к МКК при испытании методом АМУ [3]) и с дополнительным провоцирующим нагревом по режиму 650 °С в течение 1 ч (сенсibilизированные образцы, склонные к МКК при испытании методом АМУ).

Образцы готовили с помощью установки электрохимического травления (рис. 1), представляющей собой электрохимическую ячейку в форме цилиндра, которая монтировалась на контролируемую поверхность с помощью резиновой манжеты. Сердечник ус-

¹ Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения (ЦНИИТМАШ), Москва, Россия; e-mail: safonov@cniitmash.ru

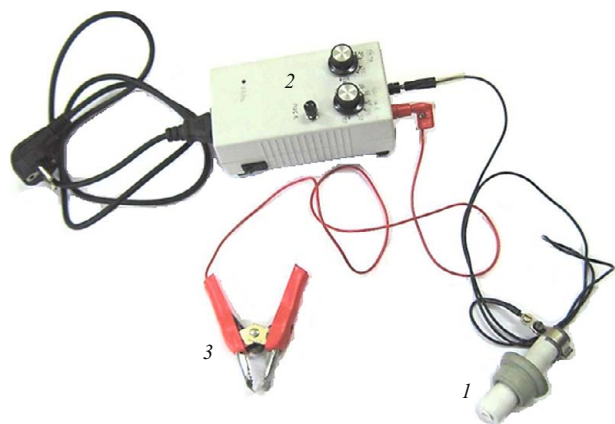


Рис. 1. Установка электрохимического травления: 1 — электрохимическая ячейка (свинцовый катод); 2 — источник питания/автоматический блок управления; 3 — крепление к исследуемому образцу/поверхности изделия (анод)

тановки — катод из листового свинца, подсоединенный к блоку питания — источнику постоянного тока, который поддерживал силу тока при травлении и задавал время автоматического отключения цепи. В схему также входили элементы для автоматической корректировки силы тока травления при образовании пузырьков водорода на поверхности металла, исключающие локальный перетрав.

Для получения качественной поверхности (до шероховатости $R_a \leq 0,8$ мкм [4]) выбрали оптимальный режим шлифовки и полировки (с учетом возможных временных затрат при проведении натурных испытаний), которые осуществляли шлифовально-полировальным прибором с гибким валом с головкой диаметром 30 мм. Использовали самоклеящуюся наждачную бумагу STRUERS (зерно № 50–800) и полировочную ткань с алмазной пастой PRESI (размер частиц 1 и 6 мкм) и смазывающей жидкостью TRANSPOL.

Травильный раствор готовили на дистиллированной воде [7]. Исходные компоненты раствора: серная кислота H_2SO_4 плотностью $1,83$ г/см³ [5], в качестве ингибитора — уротропин $(CH_2)_6N_4$ [6]. Температура раствора при проведении эксперимента составляла 20 ± 1 °C [3]. Время травления — 45 – 60 с.

Состояние поверхности образцов оценивали после загиба их на 90°. Результаты представлены на рис. 2.

Металлографическое исследование структуры исходных (несенсибилизированных) образцов на границах и в теле зерен аустенита выделений и повышенного растрва не выявило (рис. 3, а). У сенсибилизированных образцов зафиксировали интенсивный растрв по границам зерен аустенита, а также мелкие выделения карбидов хрома (рис. 3, б), определенных по внешнему виду (конфигурации и цвету).

Практическую отработку методики осуществляли при анализе состояния поверхностей внутренних элементов главных циркуляционных насосов (ГЦН) Калининской и Балаковской АЭС после 20-летнего срока

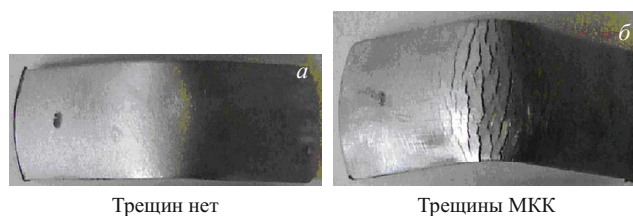


Рис. 2. Поверхность образцов после загиба на 90° и после испытания по АМУ [3]: а и б — аустенизированное и сенсибилизированное состояния

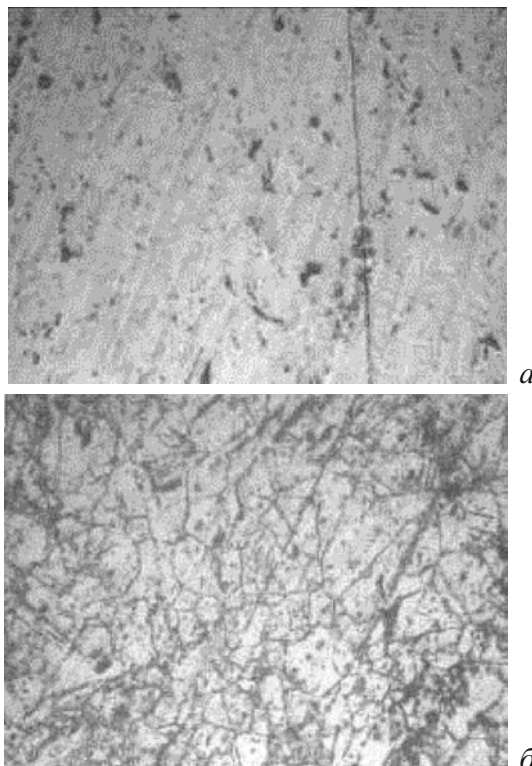


Рис. 3. Металлографическая картина структуры стали образцов после электрохимического травления (увеличение 100): а и б — аустенизированное и сенсибилизированное состояния

эксплуатации на предмет сохранения стойкости к МКК.

Исследовали следующие элементы ГЦН: корпус торцевого уплотнения (сталь 08X18H10T); выемные части (сталь 08X18H12ТФ); тепловой барьер (сталь 08X18H12ТФ).

Согласно разработанной методике плотность анодного тока травления составляла $1,53 \cdot 10^3$ А/м², время травления — 45 с. Затем проводили полировку поверхности и повторное травление по тому же режиму. Контроль каждой детали вели по двум диаметрально противоположным точкам (рис. 4, точки А и Б).

Металлографический анализ металла зон анодного травления (на примере агрегатов № 8 и № 22 Калининской АЭС) показал (см. рис. 4): металл корпуса торцевого уплотнения имеет структуру крупнозернистого аустенита; по границам зерен протравленных участков исследованных деталей не прослеживается

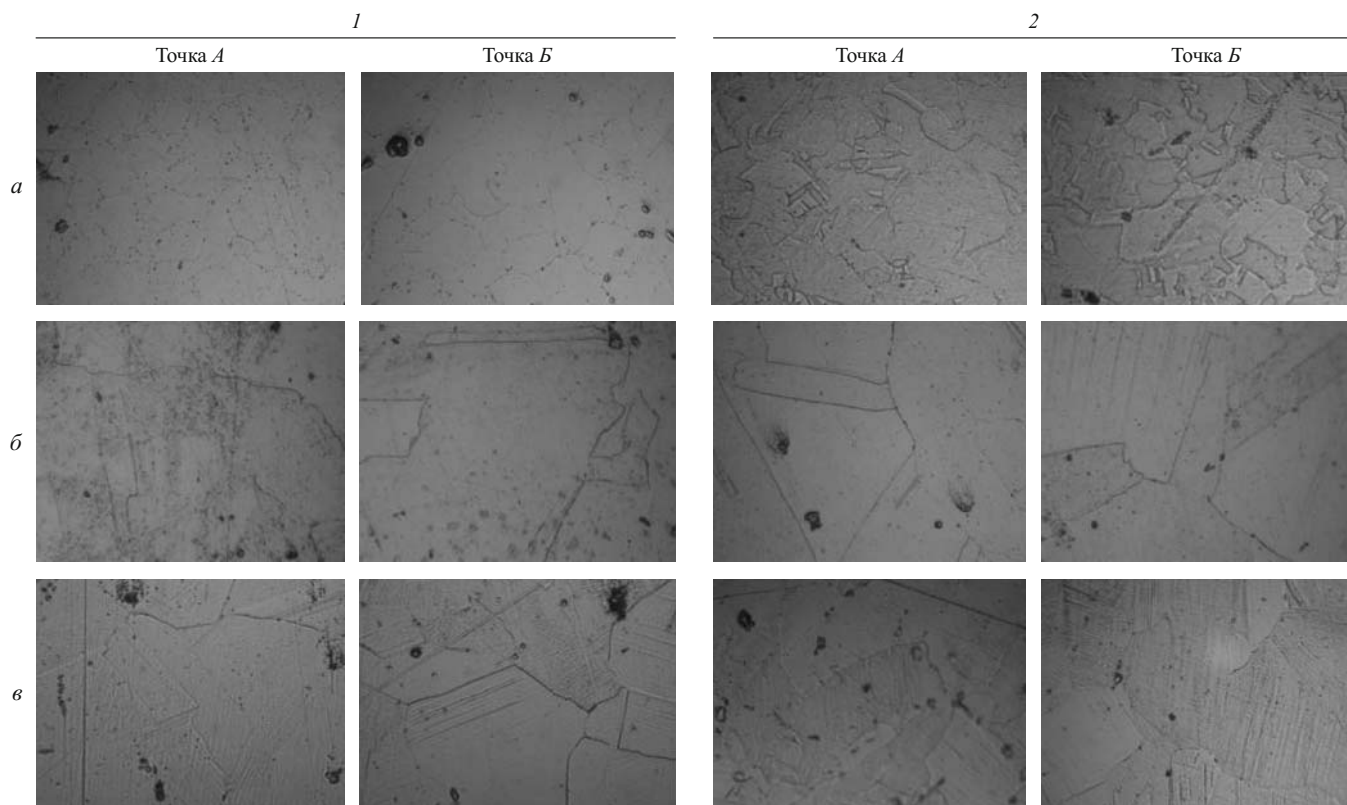


Рис. 4. Структурное состояние металла (увеличение 300) поверхности корпуса торцевого уплотнения (а), выемной части корпуса (б), теплового барьера (в): 1 — агрегат № 8; 2 — агрегат № 22

выпадение карбидов хрома (определяемых по конфигурации и цвету); отсутствуют зоны повышенной травимости (уширение) границ зерен; практически различий в структурном состоянии металла исследованного фрагмента ГЦН не прослеживается.

Полученные данные свидетельствуют, что во всех исследованных элементах ГЦН-195М Калининской и Балаковской АЭС из сталей 08X18H10T и 08X18H12TF отсутствуют признаки изменения границ зерен в поверхностных слоях металла и, следовательно, коррозионные повреждения, вызванные процессом МКК.

Таким образом, по достоверности результатов определения структурного состояния металла, обуславливающего стойкость к МКК, разработанная методика существенно превосходит метод «реплик». По принципиальному механизму она соответствует действующей научно-технической документации [2, 3]. Ее преимущества определяются следующими факторами: способ подготовки поверхности образцов для формирования «пятен» травления позволяет получить поверхность, существенно превосходящую по качеству используемую для оценки МКК методом «реплик», за счет того, что на финишном этапе подготовки шлифов применяется электрохимическая полировка с помощью специально сконструированной переносной ячейки; отсутствие громоздких приборов, лишнего функционала и удобная автоматика суще-

ственно сокращают время пребывания специалистов в зоне с повышенным радиационным фоном.

ЛИТЕРАТУРА

1. Погодин В. П., Богоявленский В. Л., Сентюров В. П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющей сталей в водных средах. — М.: Атомиздат, 1970. — 424 с.
2. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения (ПН АЭ Г-7-009-89). Сварные соединения и наплавки. Правила контроля (ПН АЭ Г-7-010-89) / Госатомэнергонадзор СССР. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 320 с.
3. ГОСТ 6032-2003. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии / Госстандарт России. — М.: Стандартинформ, 2008. — 27 с.
4. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики / Госстандарт России. — М.: Стандартинформ, 2008. — 7 с.
5. ГОСТ 4204-77. Реактивы. Кислота серная. Технические условия / Госстандарт России. — М.: Стандартинформ, 2005. — 14 с.
6. ГОСТ 1381-73. Уротропин технический. Технические условия / Госстандарт России. — М.: Стандартинформ, 2005. — 8 с.
7. ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная. Технические условия / Госстандарт России. — М.: Стандартинформ, 2007. — 11 с.

REFERENCES

1. Pogodin V. P., Bogoyavlenskii V. L., Sentyurev V. P. Mezhkristallitnaya korroziya i korrozionnoye rastreskivaniye nerzhavayushchikh staley v vodnykh sredakh [Grain-boundary corrosion and corrosion cracking of stainless steels in water environments]. — Moscow: Atomizdat, 1970. — 424 p. [in Russian].
2. Oborudovaniye i truboprovody atomnykh energeticheskikh ustanovok. Svarka i naplavka. Osnovnyye polozheniya (PN AE G-7-009-89). Svarnyye soedineniya i naplavki. Pravila kontrolya (PN AE G-7-010-89) [Equipment and pipelines of nuclear power stations. Welding and cladding. Basic provisions. Welded connections and cladding. Control Rules] /

- Gosatoménergonadzor SSSR. — Moscow: Énergoatomizdat, 1991. — 320 p. [in Russian].
3. RF State Standard GOST 6032–2003. Stali i splavy korrozionno-stoikie. Metody ispytaniy na stoikost' k mezhkristallitnoi korrozii [Corrosion-resistant steels and alloys. Test methods of intercrystalline corrosion resistance] / Gosstandart Rossii. — Moscow: Standartinform, 2008. — 27 p. [in Russian].
 4. RF State Standard GOST 2789–73. Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki [Surface roughness. Parameters and characteristics] / Gosstandart Rossii. — Moscow: Standartinform, 2008. — 7 p. [in Russian].
 5. RF State Standard GOST 4204–77. Reaktivy. Kislota sernaya. Tekhnicheskie usloviya [Reagents. Sulphuric acid. Specifications] / Gosstandart Rossii. — Moscow: Standartinform, 2005. — 14 p. [in Russian].
 6. RF State Standard GOST 1381–73. Urotropin tekhnicheskii. Tekhnicheskie usloviya [Hexamethyleneciramine for industrial use. Specifications] / Gosstandart Rossii. — Moscow: Standartinform, 2005. — 8 p. [in Russian].
 7. RF State Standard GOST 6709–72. Voda distillirovannaya. Tekhnicheskie usloviya [Distilled water. Specifications] / Gosstandart Rossii. — Moscow: Standartinform, 2007. — 11 p. [in Russian].