

В. А. БАРАТ^{1,2}, д-р. техн. наук, доц.

В. В. БАРДАКОВ¹, канд. техн. наук

А. Ю. МАРЧЕНКОВ¹, канд. техн. наук, доц.

А. А. ПАНЬКИНА¹

И. А. ЛУКАШЕВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, Россия)

²ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ» (Москва, Россия)

ВЫЯВЛЕНИЕ МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ НА НАТУРНЫХ ОБРАЗЦАХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Аннотация. Работа посвящена обнаружению межкристаллитной коррозии (МКК) аустенитной стали AISI 304 методом акустической эмиссии (АЭ). Объектом исследования являются натурные образцы в виде фрагментов труб с наружным диаметром 25 мм и толщиной 2,5 мм. Часть образцов исследовалась в исходном состоянии, а часть – после сенсibilизирующей термообработки и последующей коррозионной обработки, в результате которой произошло появление и развитие МКК. Образцы испытывались циклическим растяжением с максимальным напряжением цикла 75 МПа, соответствующим упругой области диаграммы растяжения с применением метода АЭ. На основании анализа данных АЭ было установлено, что МКК даже на ранних стадиях развития может быть выявлена на основании регистрации импульсов АЭ со средней активностью до 1.8 имп./цикл и амплитудой до 55 дБ, а также на основании результатов локации источников АЭ, совпадающих по расположению с зонами МКК.

Ключевые слова: межкристаллитная коррозия, обнаружение межкристаллитной коррозии методом акустической эмиссии, мониторинг развития межкристаллитной коррозии

Введение

Межкристаллитная коррозия – один из самых опасных видов повреждений аустенитных сталей. МКК при малой степени повреждений не имеет выраженных визуальных признаков и представляет собой дефект микроскопического размера, ниже уровня чувствительности большинства методов неразрушающего контроля. Около 11 % аварий промышленного оборудования происходит из-за несвоевременного выявления МКК [1].

На сегодняшний день МКК при малой степени повреждений выявляют на основании косвенных признаков – по изменению электрической проводимости [2] или по увеличению коэффициента затухания акустических волн [3].

В данной работе рассматривается возможность выявления МКК с помощью метода акустической эмиссии (АЭ). Метод АЭ позволяет выявлять МКК при малой степени повреждения до появления выраженных дефектов сплошности, так как образование карбидной сетки и охрупчивание границ зерен приводит к изменению характера дислокационного скольжения, и изменению параметров акустического излучения, ассоциированных с этими источниками [4]. Поэтому наличие МКК в контролируемых объектах должно приводить к изменению динамики накопления импульсов АЭ по сравнению с бездефектными случаями.

В качестве объекта исследования в данной работе была выбрана аустенитная коррозионно-стойкая сталь AISI 304. Выбор данной марки обусловлен её широкой распространенностью и повышенной восприимчивостью к МКК, вызванной высоким содержанием углерода (до 0,12 %) и отсутствием в системе легирования стабилизаторов (титан, ниобий), обладающих большим сродством к углероду, чем хром. Испытания, проведенные на фрагментах труб стали AISI 304, выявили существенное различие в активности и амплитудах импульсов АЭ для образцов с МКК и референсных бездефектных образцов без МКК.

Материалы и методы исследования

Испытаниям подвергались натурные элементы трубопроводов — фрагменты труб с наружным диаметром 25 мм и толщиной стенки 2,5 мм. Каждый образец представлял собой сборку из трёх секций: двух крайних секций длиной по 150 мм и центральной секции длиной 100 мм, соединённых между собой кольцевыми сварными швами. Сборку выполняли стыковой аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом (TIG) в качестве присадочного материала применяли порошковую проволоку «Сабарос О 101» диаметром 1,6 мм.



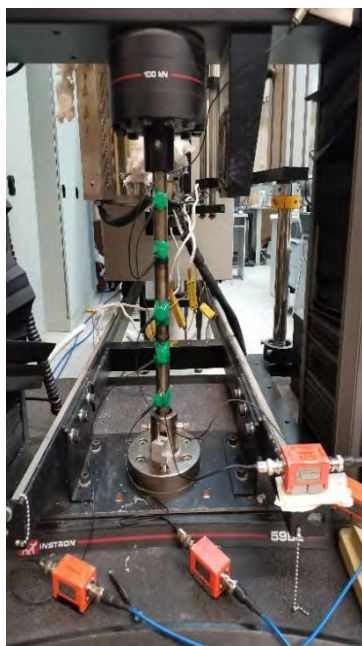
Рис. 1. Фотография сварного образца для проведения испытаний

Крайние секции всех образцов изготавливались из труб в состоянии поставки. Центральные секции части образцов перед сваркой подвергали предварительной сенсibiliзирующей термической обработке и коррозионной обработке. Термическая обработка проводилась при температуре 600 °С в течение 25 часов, коррозионная обработка проводилась с помощью выдержки в кипящем растворе сернокислой меди и серной кислоты в присутствии металлической меди (метод АМУ, ГОСТ 6032-2017) в течение 8 часов.

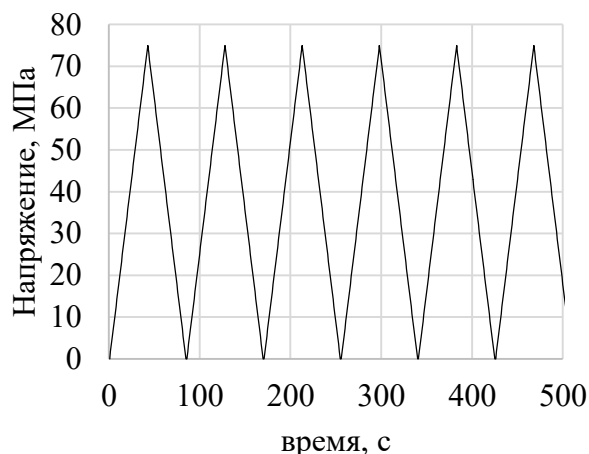
Таким образом, часть изготовленных сварных образцов содержала участки сенсibiliзированного металла с нанесенной МКК, часть образцов были полностью изготовлены из металла в состоянии поставки и использовались в качестве референсных (бездефектных).

Механические испытания образцов проводили на универсальной испытательной машине Instron 5982 (рис. 2а). Циклическое нагружение

образцов проводили циклами треугольной формы частотой 0,011 Гц с максимальным напряжением цикла $\zeta_{max} = 75$ МПа и коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,1$ (рис. 2б). Нагружение проводилось в течение 50 циклов с регистрацией данных АЭ. Данные АЭ регистрировали с помощью системы A-Line 32 (ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ») с предусилителями ПАЭФ-014 и преобразователями АЭ GT200 (ООО «Глобал Тест») с резонансной частотой 180 кГц.



а)



б)

Рис.2. Установка для испытания образцов (а), диаграмма циклического нагружения (б)

В эксперименте использовались пять преобразователей АЭ, три из которых устанавливались в центральной части образца, а два оставшихся использовались в качестве сторожевых преобразователей и устанавливались у захватов испытательной машины (рис. 2а). На этапе предварительной обработки данных из рассмотрения исключались данные об акустических событиях, у которых времена прихода импульсов на сторожевые преобразователи были меньше, чем на преобразователи, установленные в центре образца.

Результаты

По данным АЭ наблюдается существенное различие АЭ параметров при испытании образца в исходном состоянии (бездефектного) и образца с МКК. При испытании бездефектного образца (рис.3а) наблюдаются единичные случайные импульсы (10 импульсов за 50 циклов нагружения), амплитуда импульсов не более 45 дБ. Образец после термической обработки и коррозионной обработки характеризуется существенно большей АЭ активностью, импульсы регистрируются регулярно, в течение каждого цикла

нагружения. Средняя активность составляет порядка 1,8 имп./цикл, амплитуды импульсов АЭ достигают 55 дБ.

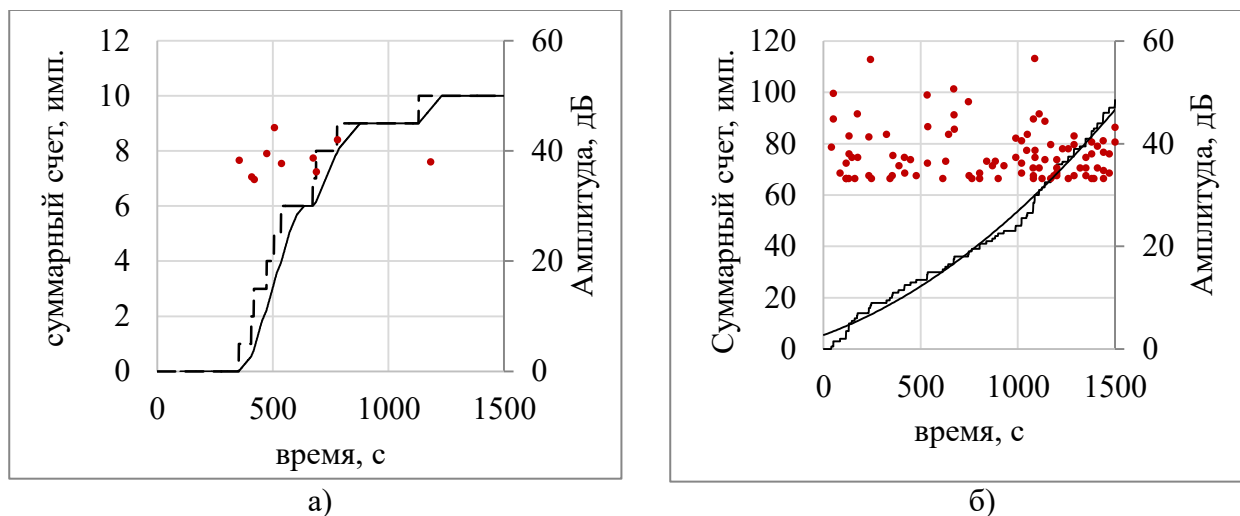


Рис.3. Параметры импульсов АЭ: суммарный счет и значения амплитуд для образца в исходном состоянии (а) и для образца с МКК (б)

На рис.4 показаны результаты линейной локации источников АЭ для образца с МКК. Всего зарегистрировано 45 АЭ событий, преимущественно в центральной части образца, соответствующей расположению участка трубы, прошедшего термическую и коррозионную обработку.

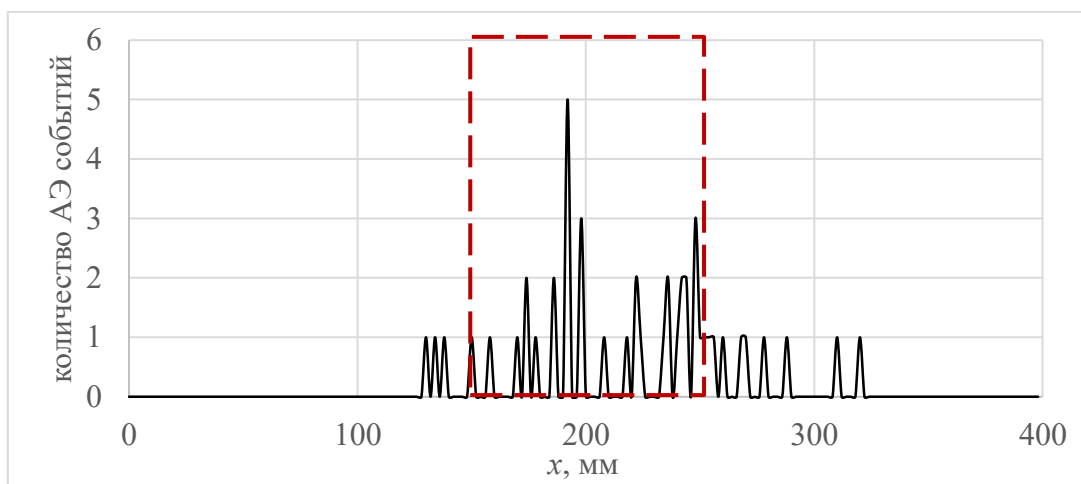


Рис.4 – Результат локации АЭ событий для образца с МКК (красная рамка – область локализации МКК в центральной части образца)

Заключение

При циклическом нагружении образца в исходном состоянии генерация АЭ практически не наблюдаются. Низкая АЭ активность объясняется малым значением максимального напряжения цикла $\sigma_{max} = 75$ МПа, которое приблизительно в 2,5 раза меньше предела текучести стали AISI 304 ($\sigma_{0,2} \sim 205$ МПа). Единичные импульсы малой амплитуды, зарегистрированные

во время испытаний, могут быть связаны с эффектами микропластической деформации в материале образца.

Наличие активного процесса АЭ в образце с МКК, выраженного возрастающим трендом суммарного счета и относительно высокими значениями амплитуд импульсов АЭ, может объясняться влиянием хрупких фаз, образовавшихся в результате коррозионного процесса, а также возможным снижением характеристик прочности в результате длительной коррозионной обработки.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 5-29-01394, <https://rscf.ru/project/25-29-01394/>.

Список литературы

1. Петровнина И.Н., Скороходов В.А. Катодные процессы при межкристаллитной коррозии хромоникелевой нержавеющей стали // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1. С. 1–14.
2. Sánchez-Amaya J.M., González-Rovira L., Amaya-Vázquez M.R., Botana F.J. Experimental correlation between metallographic evaluation and electrochemical noise in intergranular corrosion tests of aluminium alloys // Surface and Interface Analysis. 2012. Vol. 44. № 9. P. 1279–1286
3. Doerr C., Kim J., Singh P., Wall J.J., Jacobs L.J. Evaluation of sensitization in stainless steel 304 and 304L using nonlinear Rayleigh waves // NDT and E International. 2017. Vol. 88. P. 17–23.
4. Barat V.A., Marchenkov A.Yu., Pankina A.A., Lavrik N.V., Lepsheev E.A. Study of the feasibility of using the acoustic emission method to determine the corrosion resistance of austenitic steels // Frontier Materials & Technologies. 2026. № 1. P. 9–21.

Контакты:

BardakovVV@mpei.ru (Бардаков Владимир Васильевич)

BaratVA@mpei.ru (Барат Вера Александровна)

Marchenkovay@mpei.ru (Марченков Артем Юрьевич)

PankinaAA@mpei.ru (Панькина Анастасия Алексеевна)

Lukashevia@interunis-it.ru (Лукашев Иван Алексеевич)