

УДК621.311.25:620.19:620.18:537.622

КОРРОЗИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС И ПРОБЛЕМЫ ИХ КОНТРОЛЯ

Л. С. ОЖИГОВ, А. С. МИТРОФАНОВ, И. Ю. ДОБРОВОЛЬСКАЯ,
С. В. ШРАМЧЕНКО, Р. Л. ВАСИЛЕНКО,
Н. Д. РЫБАЛЬЧЕНКО, Е. А. КРАЙНЮК

*Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий Национального
научного центра "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины*

Получены результаты контроля трубопроводов из стали 20 для АЭС при помощи неразрушающего метода магнитной памяти металла. Изучены структура и дефекты металла трубопроводов после длительной эксплуатации. Выявлено, что результаты структурных исследований достаточно хорошо коррелируют с данными неразрушающего метода магнитной памяти металла. Установлены причина и характер образования повреждений в металле трубопровода АЭС.

Ключевые слова: *неразрушающий контроль, магнитная память металла, металл трубопровода, дефекты, атомная электростанция.*

С увеличением сроков эксплуатации энергоблоков атомных электростанций (АЭС) становится актуальной проблема коррозионного износа теплообменного оборудования и трубопроводов, изготовленных из низколегированной стали. На Запорожской и Южно-Украинской АЭС (ЮУАЭС) неоднократно фиксировали случаи протечек технической воды из трубопроводов с диаметрами 38...150 мм. Межремонтный их контроль, согласно нормативной документации [1], заключается в визуальном осмотре коррозионного состояния металла наружной поверхности. О коррозионных процессах судят по повреждениям защитного лакокрасочного покрытия, наличию потеков, наростов и капельной течи. Считают, что технологической причиной образования дефекта является контакт металла трубопровода с коррозионно-агрессивной средой, обогащенной кислородом (техническая вода группы "А"). Дефекты проявляются в виде очаговой коррозии. По результатам осмотра обычно заменяют дефектные участки трубопровода. Однако сквозные дефекты возникают во время эксплуатации энергоблоков, а заменяют участки в ходе планово-предупредительных ремонтов. Для решения этой проблемы следовало бы определить поврежденные участки металла на стадии перед раскрытием дефектов с помощью методов неразрушающего контроля (НК). Однако существующие методы НК, в их числе широко применяемый на АЭС метод ультразвукового контроля, здесь недостаточно эффективны. Из-за большой протяженности и сложной конфигурации трубопроводов невозможны 100%-й контроль и гарантированное обнаружение локального критического дефекта при выборочной проверке. Важным препятствием есть также то, что результаты, полученные методами НК, применяемыми на атомных станциях в соответствии с нормативной документацией, как правило, не дают представлений о степени опасности и скорости роста дефекта.

В Национальном научном центре "Харьковский физико-технический институт" (ННЦ ХФТИ) имеется опыт по применению при контроле труб и сварных сое-

Контактная особа: А. С. МИТРОФАНОВ, e-mail: mitrofanov@kipt.kharkov.ua

динений на АЭС метода магнитной памяти металла (МПМ). Есть основания считать, что этот метод целесообразен для сплошного контроля трубопроводов из низколегированной стали на энергоблоках АЭС при условии, что по результатам магнитограмм можно установить степень опасности дефектов.

Цель данной работы – оценить возможности метода МПМ для контроля трубопроводов из углеродистой стали 20 и сопоставить его результаты с полученными металлографией и электронной микроскопией.

Материалы и методы исследований. Изучали [2] отрезки труб из системы технического водоснабжения ответственных потребителей (СТВОП VF), вырезанные на ЮУАЭС во время планового ремонта. Трубопровод находился в эксплуатации с 2014 г. Его материал – сталь 20, наружный \varnothing 38 mm, толщина стенки 3 mm. Условия работы: 30°C, 6 atm. Отрезки труб контролировали методом МПМ, используя магнитометр ИКН-1М-3 с феррозондовым датчиком [3]. В местах аномальных значений магнитного поля с помощью микроскопа GX51 “Olympus” выполнили металлографический анализ шлифов, изготовленных в поперечных и продольных сечениях труб. Поверхность, элементный состав металла и включений изучали на растровом электронном микроскопе JSM-7001 (JEOL) с разрешением 4 nm, оснащенный системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350.

Результаты и их обсуждение. Во время контроля методом МПМ исследуемую поверхность сканировали феррозондовым датчиком, измеряя напряженность собственного магнитного поля рассеивания (СМПР). Сигналы от датчика записывали в виде графика распределения напряженности магнитного поля H_p и его градиента dH_p/dx по контролируемой поверхности. По этому графику судили о наличии зон концентрации напряжений, а также о расположении мест с дефектами структуры металла [4]. Обработанные данные одной из типичных магнитограмм, полученной после сканирования отрезка трубы с дефектами, приведены в виде графика на рис. 1. По оси L_x отложены расстояния вдоль контролируемого отрезка, по оси H_p – значение нормальной составляющей СМПР (верхняя часть графика), а по оси dH/dx – градиент магнитного поля (нижняя часть).

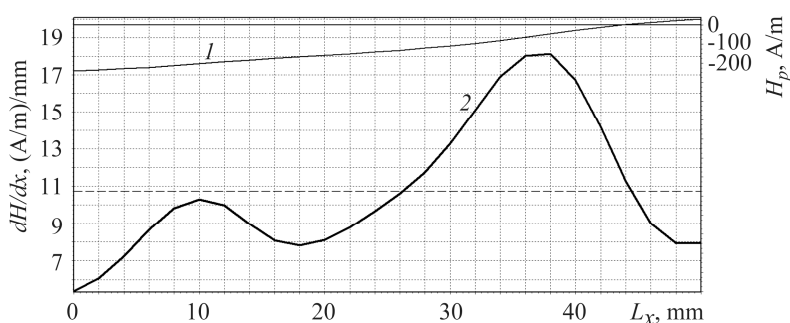


Рис. 1. Магнитограмма, полученная методом контроля МПМ дефектного отрезка трубопровода (сталь 20) системы технического водоснабжения ответственных потребителей ЮУАЭС: 1 – собственное магнитное поле рассеивания; 2 – его градиент.

Fig. 1. Magnetogram obtained by non-destructive control of magnetic memory metal (MMM) of defective pipe piece (20 steel) in the system of technical water supply of SUNPP responsible consumers: 1 – eigen magnetic scattering field; 2 – gradient of magnetic field.

На шлифе, изготовленном в продольном сечении фрагмента трубы, обнаружили два ряда несплошностей в металле (рис. 2). Дефекты пересекают всю стенку трубы и их расположение соответствует большему максимуму на графике

dH/dx (зависимость 2, рис. 1). В области меньшего максимума выявлены дефекты на ранней стадии развития (рис. 2*a*). Таким образом, метод МПМ позволяет обнаружить на трубе из стали 20 с толщиной стенки 3 мм как сквозные, из-за которых был вырезан отрезок трубопровода при ремонте, так и зарождающиеся дефекты от внутренней поверхности.

Металлографические исследования свидетельствуют, что дефекты (неплотности) в металле труб представляют собой скопления неметаллических включений (рис. 2*b*), которые соединены “паутиной” волосовидных трещин (рис. 2*c*). Загрязненность металла неметаллическими включениями, определенная методом сравнения с эталонными шкалами [5], соответствует четвертому баллу по шкале силикатов.

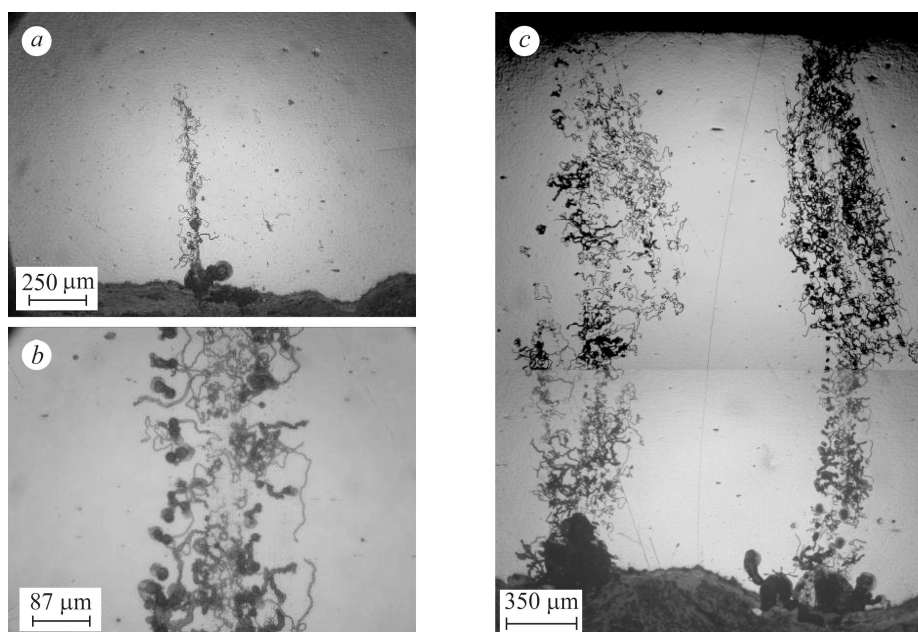


Рис. 2. Вид дефектов в продольном сечении фрагмента трубы: *a* – зарождающиеся дефекты; *b* – неметаллические включения; *c* – сквозные неплотности через стенку трубы.

Fig. 2. Defect longitudinal view of the pipe segment: *a* – incipient defects; *b* – nonmetallic inclusions; *c* – through defects across the pipe wall.

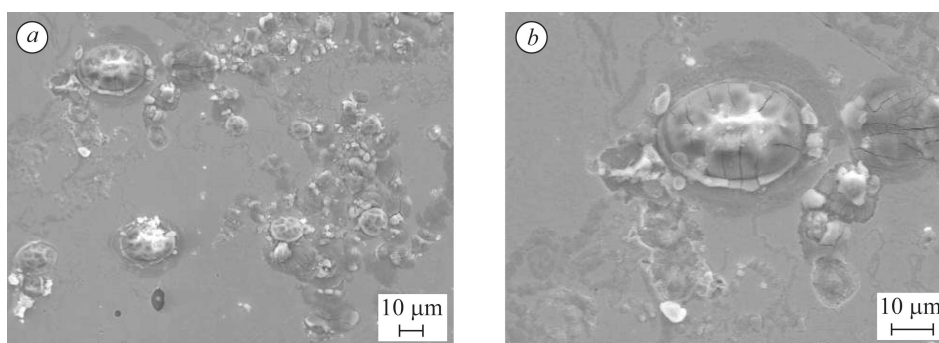


Рис. 3. Неметаллические включения с сетками оксидов (*a*) и радиальными трещинами (*b*).

Fig. 3. Nonmetallic inclusions with oxide nets (*a*) and radial cracks (*b*).

С помощью растрового электронного микроскопа выявили, что включения имеют глобулярную форму и размер до 30 μm . На их поверхности видны сетки оксидов (рис. 3а) и радиальные микротрещины (рис. 3б).

Зафиксировали отслоение металла от поверхности включений, обусловленные, по-видимому, образованием трещин при окислении или изменениях температуры. Сетка трещин (см. рис. 2с) между включениями представляет собой разного диаметра капилляры, заполненные продуктами коррозии (рис. 4а).

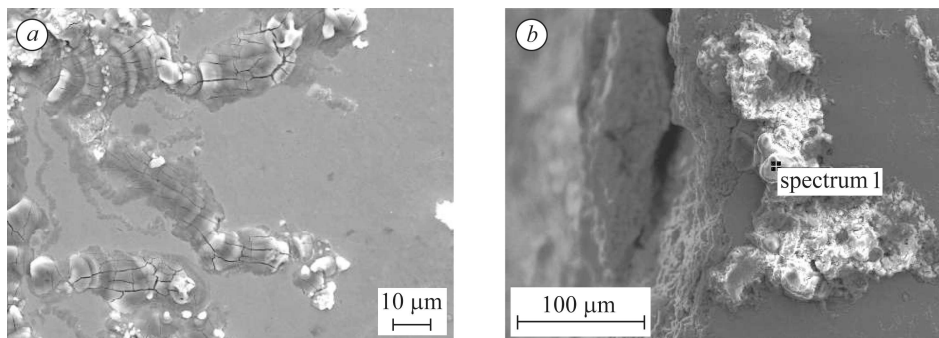


Рис. 4. Фрагменты несплошностей: *a* – продукты коррозии в трещинах между включениями; *b* – включения и зона коррозии, выходящая на внутреннюю поверхность трубы.

Fig. 4. Fragments of discontinuities: *a* – corrosion products in the cracks between the inclusions; *b* – inclusions and corrosion zone cropped out at the internal surface of the pipe.

Определили элементный состав матричного металла, расположенных в нем отдельных включений, а также включений и продуктов коррозии в несплошностях. Как и ожидали, состав матричного металла соответствует стали 20.

Неметаллические включения в стали содержат (at.%): 30...50 O; 0...2,5 Mg; 0...4 Al; 7...20 Si; 0...12 S; 0,2...3 Ca; 0,2...9 Mn; 15...54 Fe. Большинство из них – это недеформируемые силикаты, а также сложные соединения силикатов и оксидов. Встречаются составы смешанных соединений оксидов, силикатов и сульфидов, которые, возможно, внесены в металл из раскислителей при его плавке.

Внутридефектные включения содержат (at.%): 20...30 O; 0...3 Mg; 0...1,5 Al; 0...20 Si; 0,2...3 S; 0,2...3 Ca; 0,2...11 Mn; 15...70 Fe; 0,5...3 Cl. Хлор в продуктах коррозии в трещинах между включениями свидетельствует о его участии в коррозионных процессах. Он может поступать с технической водой, в которой содержание хлоридионов в зависимости от сезона года изменяется от 60 до 120 mg/dm^3 .

Включения неравномерно рассредоточены по всему металлу, встречаются участки, где они выходят на поверхность трубы. Такой участок изображен на рис. 4б, где вокруг группы включений, выходящих на поверхность металла, образовалась язва, от которой коррозия распространяется вглубь металла (см. рис. 2). Язва имеет диаметр менее 1 мм, при этом коррозия распространяется от нее по цепочкам включений через всю стенку трубы.

Растрескивание глобулярных включений свидетельствует о больших напряжениях в металле после увеличения объема при химических превращениях. Под их воздействием подрастают трещины-капилляры и несплошности, причем направление их роста задает расположение включений. Сетка окислов, а также радиальные микротрещины на глобулах включений говорят об их сложном фрагментарном строении.

Исследовали влияние микроструктуры металла на развитие коррозионных повреждений. Для этого использовали шлифы, обработанные химическим травителем для выявления микроструктуры (рис. 5а).

Следовательно, включения, выходящие на поверхность металла, определяют образование локальных коррозионных язв, а последующий рост трещин от них зависит как от концентрации и распределения включений, так и от характера микроструктуры, в частности, перлитной составляющей. Вследствие распространяющейся по перлитным цепочкам коррозии возникают капилляры, проявляющиеся на шлифах как “паутина”, тогда как между включениями формируются каналы большего диаметра. В месте сквозной несплошности (см. рис. 2*b*) со временем эксплуатации образуется капельная течь, свищ, а в дальнейшем – протечка.

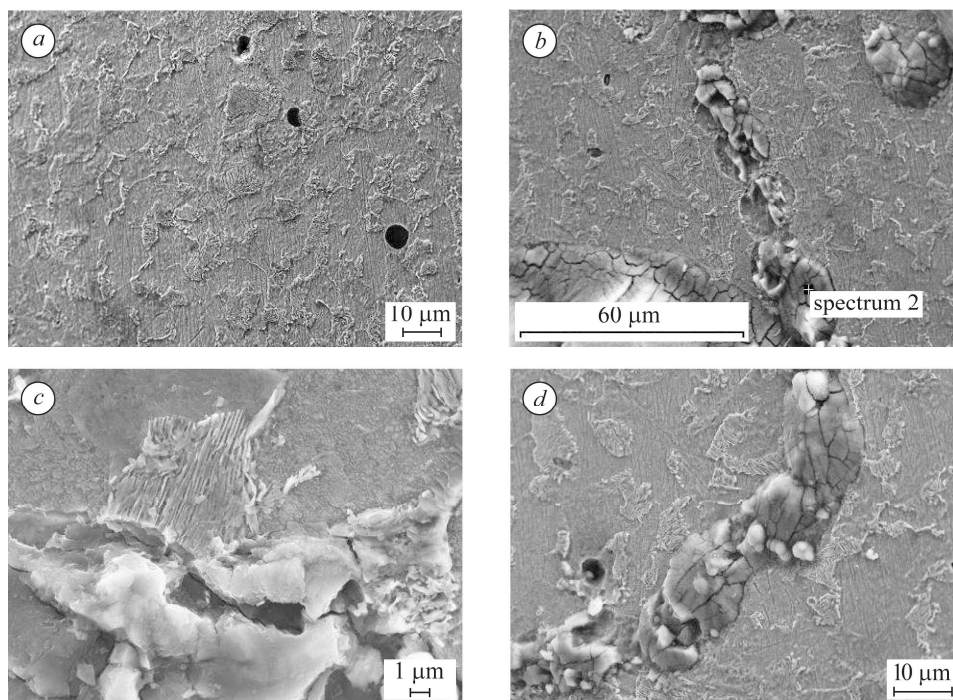


Рис. 5. Микроструктура стали 20 и развитие коррозионных повреждений:
a – феррито-перлитная со следами включений; *b* – распространение канала с продуктами коррозии между включениями; *c* – окисление перлитных зерен;
d – их разрушение и образование коррозионной трещины.

Fig. 5. Microstructure of 20 steel and development of corrosion damages:
a – ferrite-perlite structure with the traces of inclusions; *b* – propagation of the channel with corrosion products between inclusions; *c* – oxidation of perlitic grains;
d – their fracture and formation of corrosion crack.

НК, основанный на методе МПМ, способен обнаружить коррозионные повреждения рассмотренного типа на стадии до образования капельной течи. При этом по магнитограммам можно определить коррозионные каналы между включениями в металле. На современной стадии приборного и программного обеспечения этим методом можно с достаточной производительностью проконтролировать весь трубопровод, что дает основания рекомендовать метод для включения в регламент контроля трубопроводов на АЭС в период планово-предупредительных ремонтов. С его помощью можно обнаружить дефекты перед их раскрытием и возникновением протечек. Он перспективен также для контроля и отбраковки труб перед монтажом трубопроводов.

ВЫВОДЫ

Исследованы коррозионные повреждения в трубопроводе из стали 20 методом магнитной памяти, а также с помощью металлографии и электронной микро-

скопии. Установлена корреляция между результатами контроля и исследований. Выявлено, что причиной поврежденных трубопроводов на АЭС является повышенное содержание неметаллических включений и строчечное расположение их в металле. Определен характер повреждений, а также проанализирован механизм их возникновения. Оценена перспективность метода для неразрушающего контроля трубопроводов из низколегированной стали на АЭС.

РЕЗЮМЕ. Отримано результати з контролю трубопроводів зі сталі 20 для АЕС за допомогою неруйнівного методу магнітної пам'яті металу. Вивчено структуру і дефекти металу трубопроводів після тривалої експлуатації. Виявлено, що результати структурних досліджень досить добре корелюють з даними неруйнівного методу магнітної пам'яті металу. Встановлено причину і оцінено утворення пошкоджень металу трубопроводу АЕС.

SUMMARY. The results of 20 steel pipelines for NPS inspection by non-destructive method of magnetic memory of the metal are obtained. Studies of structure and defects of pipeline metal after long-term operation are carried out. It is shown that the results of structure researches correlate well with the results of non-destructive control – magnetic memory of the metal. The cause and the character of metal damaging are determined.

1. ПНАЭ Г-7-016-89. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Визуальный и измерительный контроль. – М.: Госатомэнергонадзор, 1990. – 62 с.
2. Влияние неметаллических включений в низколегированной углеродистой стали на ресурс трубопроводов АЭС / Л. С. Ожигов, А. С. Митрофанов, Н. Д. Рыбальченко, Е. А. Крайнюк, Р. Л. Василенко, С. В. Шрамченко // Вопросы атомной науки и техники. – 2017. – № 4 (110). – С. 59–64.
3. ГОСТ Р ИСО 24497-2-2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Ч. 2. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2010. – 8 с.
4. Дубов А. А., Дубов Ал. А., Колокольников С. М. Метод магнитной памяти (ММП) металла и приборы контроля. – М.: ЗАО “Тиссо”, 2003. – 320 с.
5. ГОСТ 1778-70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. – М.: Госстандарт, 1970. – 30 с.

Получено 09.02.2017