

# Переработка сырья и ресурсосбережение

УДК 620.197

## Экологически безопасные способы защиты стали от коррозии в воде. 2. Формирование защитных слоев при анодном растворении алюминия

*Белюсова Н.А., Донченко М.И., Герасименко Ю.С., Редько Р.М., Саворона О.М.*

*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*

Методом поляризационного сопротивления исследована эффективность противокоррозионной защиты малоуглеродистой стали за счет формирования защитных слоев, модифицированных соединениями алюминия, которые получали при растворении алюминия анода. Максимальное торможение коррозии (в 10 раз) достигается при катодной поляризации стали с анодным растворением алюминия. Образованные плотные защитные слои, содержащие гидроксид алюминия, имеют значительное последствие, сохраняя защитные свойства при отключении поляризации и замене воды.

**Ключевые слова:** скорость коррозии, анодное растворение алюминия, алюминиевый протектор, катодная поляризация, метод поляризационного сопротивления.

Методом поляризаційного опору досліджено ефективність протикорозійного захисту маловуглецевої сталі формуванням захисних шарів, модифікованих сполуками алюмінію, отриманими розчиненням алюмінієвого анода. Максимальне гальмування корозії (у 10 разів) досягається за умови катодної поляризації сталі з анодним розчиненням алюмінію. Утворені щільні захисні шари, що містять гідроксид алюмінію, мають значну післядію, зберігаючи захисні властивості при відключенні поляризації та зміні води.

**Ключові слова:** швидкість корозії, анодне розчинення алюмінію, алюмінієвий протектор, катодна поляризація, метод поляризаційного опору.

Ухудшение технического состояния стальных трубопроводов водопроводных систем значительно снижает эффективность их работы, приводит к росту аварийности вследствие коррозии и, следовательно, возрастанию нерационального расхода ресурсов воды и металла. Показатель потерь воды в городских системах Украины достигает 0,4–3,0, а в Западной Европе 0,1–0,4 (м<sup>3</sup>/км)/ч [1]. В связи с этим не теряет актуальности проблема создания технологий обеспечения надежности и долговечности материалов и оборудования водопроводных систем, где доля стальных труб составляет более 50 %.

В системах горячего водоснабжения наиболее распространенными методами защиты трубопроводов от внутренней коррозии являются деаэрация, силикатирование, защита с помощью алюминиевых протекторов [2] или растворимых магниевых анодов [3].

В основе протекторной защиты лежит эффект торможения процесса растворения стали при смещении ее потенциала в отрицательную сторону. Защита с помощью магниевых анодов основана на повышенной реакционной способности продуктов их электрохимического растворения, которые преобразуются в малораствори-

мые соединения в объеме раствора и на поверхности корродирующего металла вследствие химических реакций. Подобным образом должны, вероятно, влиять и алюминиевые аноды, что обусловлено ингибирующим действием ионов алюминия так же, как магния, цинка [4, 5].

Цель данной работы — исследование эффективности противокоррозионной защиты малоуглеродистой стали в воде различной минерализации посредством формирования защитных фазовых слоев при растворении алюминиевых анодов для создания экологически безопасного способа защиты от коррозии функционирующих трубопроводов водопроводных систем.

Коррозионные исследования малоуглеродистой стали 20 проводили в модельных водных растворах различной минерализации и водопроводной воде г. Киева. Составы воды были выбраны с учетом рекомендаций [6]: мягкая вода — общая жесткость  $J_0 = 0,506$  мг-экв/дм<sup>3</sup>, солесодержание 473 мг/дм<sup>3</sup>, рН 6,5; жесткая вода —  $J_0 = 8,43$  мг-экв/дм<sup>3</sup>, солесодержание 3716 мг/дм<sup>3</sup>, рН 7,6. Водопроводная вода имеет такие основные среднегодовые показатели:  $J_0 = 3,5-4,2$  мг-экв/дм<sup>3</sup>; солесодержание 350–430 мг/дм<sup>3</sup>; рН 7,0–7,5. Кроме карбонатов, которые способствуют образованию защитных пленок, вода содержит коррозионно-активные компоненты (сульфаты, хлориды, растворенный кислород).

Скорость коррозии определяли массометрическим методом и электрохимическим методом поляризационного сопротивления (метод  $R_p$ ) с помощью двухэлектродных датчиков ( $S_{\text{пов}} \approx 12$  см<sup>2</sup>/датчик) и прибора Р5126. Прибор обеспечивает компенсацию омического сопротивления раствора и образующегося слоя, выделяя величину электрохимической составляющей  $R_p$ . Предварительные исследования показали, что коэффициент пересчета  $R_p$  (Ом) на скорость коррозии ( $I_p$ , мм/год) малоуглеродистой стали в воде  $B = 100$  Ом·мм/год. Опыт проводили в условиях естественной аэрации при комнатной температуре в течение 20–200 ч при перемешивании воды лопастной мешалкой со скоростью 60 об/мин. Датчики устанавливали в емкости объемом 1,2 дм<sup>3</sup> в радиальной плоскости перпендикулярно потоку воды.

Провели несколько серий опытов в воде с тремя датчиками: 1 — контрольные опыты, то есть в воде отсутствуют дополнительные электроды и ингибиторы; 2 — алюминиевый анод растворяется в паре с катодом из нержавеющей стали; 3 — алюминиевый анод замкнут с двумя стальными датчиками внешним контактом (протекторная защита), а третий датчик, который

не замкнут с алюминием, является контрольным; 4 — алюминий растворяется анодно в паре с двумя стальными датчиками, которые подключены как катоды, а третий (контрольный) датчик не подключен к источнику питания; 5 — анодом служит нержавеющая сталь, катодом — датчики (катодная защита); 6 — в воду вводится соль алюминия в роли ингибитора, алюминиевые аноды отсутствуют.

В качестве растворяемого алюминиевого анода использовали проволоку-катанку АКЛП-ПТ ТУ/1-99/ (99,7 %) номинальным диаметром 9,5 мм и площадью 56,5 см<sup>2</sup>. Из поляризационных измерений установили, что без внешней поляризации на алюминии присутствуют пассивные пленки. Анодная плотность тока, которая инициирует растворение алюминия в воде, должна быть не ниже 0,1 мА/см<sup>2</sup> (0,01 А/дм<sup>2</sup>). Выбранные величины  $i_a$  составляли 0,18 и 0,37 мА/см<sup>2</sup>. При исследовании протекторной или катодной защиты на время измерения  $I_p$  методом поляризационного сопротивления датчики периодически отключали от внешней поляризации на 3–5 мин.

Интегрированием полученных кривых  $I_p - t$  (скорость коррозии — время испытаний) находили средние значения скорости коррозии, которые сопоставляли с данными массометрии.

Защитный слой, образующийся на поверхности стали в процессе коррозии, зависит от состава воды, температуры и состоит из продуктов коррозии железа (гидроксида, гетита, лепидокрокита, маггемита,  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, гидратированных оксидов, основных карбонатов) и компонентов раствора, например, основных солей и карбонатов кальция в виде кальцита и арагонита [7, 8]. По данным [9], в жестких водах CaCO<sub>3</sub> осаждается на поверхности корродирующего металла в основном в виде рыхлого шлама, а в мягких водах вероятно формирование более равномерных сплошных осадков. Коррозионная активность воды, зависящая от суммарного содержания анионов сульфатов и хлоридов, существенно влияет на устойчивость и сплошность защитных слоев, поскольку эти анионы активируют поверхность металла и приводят к точечной коррозии и питтингообразованию [8, 9].

Высокая чувствительность метода  $R_p$  позволяет по мгновенным значениям скорости коррозии  $I_p$  судить о формировании защитных слоев при коррозии металла. На рис. 1, 2 приведены зависимости  $I_p - t$  за 30 ч эксперимента с отключением перемешивания в ночные часы. В начальный период на свежезачищенной поверхности датчика  $I_p \approx 1,0-1,2$  мм/год. Уже через 10 мин на ней появляется бурый налет продуктов коррозии, а через 1 ч вода заметно желтеет.

Накопление малорастворимых соединений на поверхности стали приводит к замедлению коррозии. При этом коррозия приобретает локальный характер. Резкий спад скорости коррозии при выключении перемешивания согласуется с диффузионным контролем коррозии с кислородной деполаризацией. По мере образования защитных слоев скорость коррозии снижается во времени в жесткой воде быстрее, чем в мягкой. Это можно объяснить более высоким значением рН и концентрации солей кальция и магния в жесткой воде [10].

В мягкой воде замедление коррозии во времени несущественно, причем на вторые сутки при включении перемешивания мгновенные значения  $I_p$  достигают начальной величины около 1,0 мм/год. Их колебания отражают динамику образования и растворения (или частичного отрыва) продуктов коррозии (рис.1, кривая 1).

Использование анодного растворения алюминия для защиты стали от коррозии основано на переходе в воду катионов алюминия:  $Al^0 \rightarrow Al^{3+} + 3e$ , которые, гидролизуясь, образуют коллоидный гидроксид:  $Al^{3+} + 3OH^- \rightarrow Al(OH)_3$ .

Процесс гидролиза происходит стадийно с образованием различных форм (в зависимости от рН и анионного состава раствора) аква-гидрокомплексов алюминия [11], которые могут превращаться в полимерные соединения, мицеллы сложного состава. Полагают, что полный гидролиз до гидроксида происходит приблизительно при рН 7. В объеме воды протекает процесс коагуляции коллоидных частиц аналогично тому, как это происходит при обработке воды соответствующими солями алюминия. На поверхности стали образование малорастворимого гидроксида происходит быстрее из-за подщелачивания приэлектродного слоя при коррозии с кислородной деполаризацией.

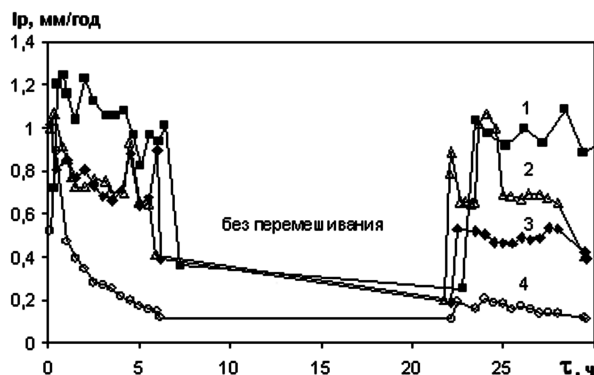


Рис.1. Изменение скорости коррозии стали 20 во времени в мягкой воде: 1 — без растворения Al анода; 2 — с алюминиевым протектором; 3 — с растворением Al анода ( $i_a = 0,37 \text{ мА/см}^2$ , катод — нержавеющая сталь); 4 — с растворением Al анода ( $i_a = 0,37 \text{ мА/см}^2$ , катод — корродирующий датчик).

Растворение Al по-разному влияет на коррозию стали и образование защитных слоев в водопроводной, модельных жесткой и мягкой водах, но есть и общие тенденции. В мягкой воде накопление ионов алюминия при его растворении ( $i_a = 0,37 \text{ А/дм}^2$ ) в паре с катодом из нержавеющей стали приводит к торможению коррозии примерно в 1,5 раза уже в первые часы экспозиции (рис.1, кривая 3) в условиях перемешивания. Продукты коррозии осаждаются на поверхности датчиков в виде неравномерных буро-зеленых пятен, которые представляют собой промежуточные продукты окисления железа до Fe (II) и Fe(III) («зеленая ржавчина») [7]. На второй день испытаний величина  $I_p$  продолжает снижаться, так что коэффициент торможения коррозии возрастает примерно до  $\gamma = 2$ , а защитные слои становятся более равномерными и приобретают бурый цвет.

Действие алюминиевого протектора (схема 3 — электроды датчика закорочены с Al) оказывается менее эффективным, хотя в начальный период  $I_p$  снижается до 0,8 мм/год (рис.1, кривая 2). Электроды также покрываются бурой пленкой, как и в воде без алюминия, однако эта пленка появляется несколько позднее — через 20 мин от начала опыта. Стабилизация защитной пленки происходит через 25 ч, о чем свидетельствует отсутствие колебаний  $I_p$ .

Более слабое торможение коррозионного процесса при протекторной защите обусловлено, очевидно, меньшей скоростью растворения алюминия по сравнению с анодным растворением в паре с катодом из нержавеющей стали. При наложении анодного тока  $i_a = 0,37 \text{ А/дм}^2$  потенциал алюминия в соответствии с поляризационными кривыми отвечает  $E_{Al} \approx -0,3 \text{ В}$ . Измерение потенциалов алюминия при коротком замыкании со сталью дало величины  $E \approx -0,62 \text{ В}$  без перемешивания и  $E \approx -0,52 \text{ В}$  при перемешивании воды (табл.1). Такое незначительное смещение потенциала от стационарного ( $E_{ст} \approx -0,68 \text{ В}$  в условиях перемешивания) свидетельствует о малой скорости растворения алюминия ( $i < 0,1 \text{ А/дм}^2$ ) в пассивном состоянии. Последнее подтверждается образованием питтинга на алюминиевом аноде.

Поляризация стали при коротком замыкании с алюминием оказалась еще меньше: потенциал сдвигается в отрицательную сторону на несколько милливольт, то есть сталь навязывает алюминию свой потенциал. Это объясняется тем, что алюминий покрыт пассивными пленками и поляризуется в большей степени, чем сталь в активном состоянии.

В результате протекторная защита стали в данном случае практически отсутствует. Влияние алюминиевого анода на коррозию стали проявляется только из-за накопления продуктов его растворения в воде и попадания в защитную пленку на стали. Таков же механизм действия алюминия и при анодном растворении с катодом из нержавеющей стали, но в последнем случае концентрация ионов алюминия и их защитное действие оказываются большими в соответствии с более интенсивным растворением анода (см. рис.1, 2).

Более эффективное торможение коррозии достигается при подключении корродирующих датчиков в качестве катодов: снижение  $I_p$  до 0,1 мм/год в модельной мягкой воде (рис.1, кривая 4) фиксируется уже в первые 5 ч. Очевидно, направленное движение гидратированных ионов  $Al^{3+}$  под действием электрического поля (миграция) облегчает их адсорбцию на поверхности корродирующей стали и образование  $Al(OH)_3$  на катодных участках поверхности. Со временем происходит дальнейшее блокирование поверхности нерастворимыми соединениями, которое обуславливает существенное торможение коррозии. Потенциал стали под током достигает величины  $-1$  В, что приводит к ускорению катодных реакций, в том числе к возникновению дополнительной реакции разряда молекул воды. В соответствии с этим происходит изменение морфологии и состава сформированной пленки. Нельзя отрицать также роль катодной защиты стали.

В жесткой воде влияние растворения алюминиевого анода имеет существенные отличия. В контрольном опыте без алюминиевых анодов (рис.2, кривая 1) происходит постепенное торможение коррозии [10]. В данном случае рН приэлектродного слоя стали быстрее достигает 8,3, что облегчает осаждение труднорастворимого карбоната кальция, гидроксидов, гидратированных оксидов железа. Это подтверждается более резким спадом кривой  $I_p - t$ .

**Таблица 1. Потенциалы стали и алюминия в мягкой воде относительно насыщенного хлор-серебряного электрода (В)**

Металл	Без замыкания пары сталь – Al		При замыкании пары сталь – Al	
	I	II	I	II
Сталь 20	-0,45	-0,53	-0,49	-0,60
Алюминий	-	-0,68	-0,52	-0,62

Примечание. I – при перемешивании; II – без перемешивания.

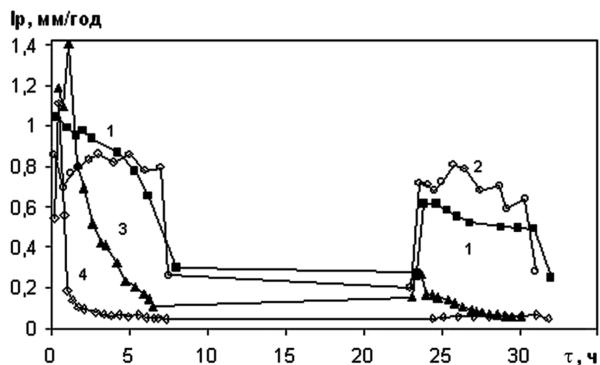


Рис.2. Изменение скорости коррозии стали 20 во времени в жесткой воде: 1 – без растворения Al анода; 2 – с растворением Al анода ( $i_a = 0,37$  мА/см<sup>2</sup>, катод – нержавеющая сталь); 3 – с растворением Al анода ( $i_a = 0,18$  мА/см<sup>2</sup>, катод – корродирующий датчик); 4 – с растворением Al анода ( $i_a = 0,37$  мА/см<sup>2</sup>, катод – корродирующий датчик).

Подключение Al протектора к датчикам в жесткой воде не вызвало снижения мгновенных значений скорости коррозии  $I_p$ . В течение первых суток отличия коррозионного поведения в сравнении с контрольным датчиком не наблюдались. Значения  $I_p$  сильно колебались во времени, ток растворения Al протектора колебался около 0,1 мА, что на порядок ниже анодного тока растворения в паре с катодом из нержавеющей стали (схема 2). Значения потенциалов стали и Al без контакта и в контакте с Al в перемешиваемой воде были практически одинаковыми и смещались со временем в отрицательную сторону от  $-0,5$  до  $-0,6$  В.

При растворении алюминия с катодом из нержавеющей стали (стальные корродирующие датчики не подключены к источнику тока) значения  $I_p$  снижаются до 0,6–0,8 мм/год в первые 2 ч испытаний (при  $i_a = 0,37$  и 1,0 мА/см<sup>2</sup>). Далее скорость коррозии начинает возрастать (рис.2, кривая 2), причем после включения перемешивания на вторые сутки значение  $I_p$  оказывается большим, чем в контрольном опыте без Al.

Вероятно, при формировании защитных слоев гидратированные комплексы ионов  $Al^{3+}$  конкурируют с катионами  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  и другими компонентами сильно минерализованной воды. Учитывая комплексообразующие свойства  $Al^{3+}$ , ускорение коррозии можно объяснить также образованием в приповерхностном слое растворимых комплексных соединений с участием продуктов коррозии железа. Кроме того, в данном случае повышение рН воды за время испытаний в среднем от 7,65 до 8,6 осложняет осаждение  $Al(OH)_3$  по сравнению с мягкой водой, имеющей более низкие значения рН. Согласно справочным данным [12], рН начала осаждения гидроксида 4,0, а интервал рН от начала до полного растворения составляет 7,8–10,8.



При подключении корродирующих датчиков как катодов снижение  $I_p$  до 0,1 мм/год в модельных жесткой (рис.2, кривые 3, 4) и в мягкой воде происходит гораздо быстрее, причем с увеличением тока растворения Al до  $i_a = 0,37 \text{ mA/cm}^2$  формирующийся слой настолько прочный и плотный, что скорость коррозии не увеличивается при включении перемешивания. Более того, защитный слой, образуемый при катодной поляризации датчиков в паре с Al анодом, имеет значительное последствие. Это четко подтверждается следующим опытом.

Коррозионные испытания датчиков в водопроводной воде при их катодной поляризации с алюминиевым анодом в течение 14 ч показали снижение скорости коррозии до 0,07 мм/год. Датчики со сформированным защитным слоем перенесли в свежую воду без Al. Величина  $I_p$  оставалась неизменной в течение последующих 5 сут испытаний. Значения  $I_p$  на контрольном датчике, который не поляризовался катодно с алюминиевым анодом, были 0,50–0,35 мм/год.

В табл.2 приведены результаты коррозионных испытаний при формировании защитных слоев на поверхности катодно поляризованной и неполяризованной стали в воде различной минерализации за 30 ч испытаний. Видно, что растворение алюминиевого анода в паре с катодом из нержавеющей стали приводит к замедлению коррозии стали 20 только при условии малой минерализации воды, а при подключении в качестве катода самих корродирующих датчиков степень защиты их от коррозии достигает 80 % независимо от степени минерализации воды.

Из рис.3,а видно, что на поверхности стали, которая не была поляризована, образованы катодные и анодные участки с наибольшей плотностью продуктов коррозии на их границах. Осадок на этом электроде имеет включения в виде больших и малых участков бурого цвета. Поверхность катодно поляризованной стали покрыта неравномерным бело-бурым слоем с четкими очагами белого осадка гидроксида алюминия (рис.3,б). Качественный анализ растворенного осадка подтвердил наличие в нем алюминия.

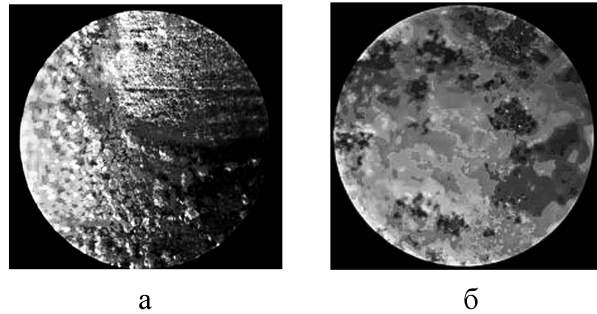


Рис.3. Вид поверхности стали (увеличение  $\times 60$ ) после 190 ч испытаний в водопроводной воде при растворении Al анода  $0,37 \text{ mA/cm}^2$  без (а) и с катодной (б) поляризацией поверхности.

Продукты растворения Al-анода расходовались не только на осаждение на поверхности металла, но и на образование коллоидных частиц в объеме воды. При отключении перемешивания коллоидные частицы осаждались на дно в виде гелеобразного бело-бурого осадка, количество которого закономерно увеличивалось с ростом плотности тока и жесткости воды. В целом плотность тока растворения алюминия в данных исследованиях на два порядка ниже применяемой в процессах электрокоагуляционной очистки воды ( $0,5\text{--}4,0 \text{ A/dm}^2$ ). В то же время, в отличие от солевых коагулянтов, вода не обогащается сульфатами или хлоридами, которые повышают ее коррозивность. Это является преимуществом данного способа по сравнению с введением в воду алюминийсодержащих ингибиторов в виде его солей.

Для сравнения эффективности защитного действия соли сульфата алюминия и ионов  $Al^{3+}$ , образованных при анодном растворении, провели следующий эксперимент. В мягкую воду по истечении 2 ч перемешивания ввели  $177 \text{ mg/dm}^3$  сульфата алюминия, что соответствовало количеству ионов  $Al^{3+}$ , образовавшихся при растворении Al-анода за 5 ч ( $28 \text{ mg/dm}^3$ ). Скорость коррозии стали первоначально возросла в 3 раза, очевидно, из-за введения в воду ионов сульфата и гидролиза соли алюминия со снижением pH до 5,9. Величина  $I_p$  уменьшилась до 0,7 мм/год лишь спустя 4 ч (рис.4). Анодное растворение алюминия обеспечивало более эффективную защиту, следовательно, влияние све-

**Таблица 2. Электрохимическое формировании защитных слоев при разной анодной плотности тока растворения алюминия**

Коррозионная среда	0,18 mA/cm <sup>2</sup>		0,37 mA/cm <sup>2</sup>		1,0 mA/cm <sup>2</sup>	
	$\gamma$	z, %	$\gamma$	z, %	$\gamma$	z, %
Мягкая вода	1,66/2,17	39,6/53,9	1,91/3,86	47,6/74,1	-/-	-/-
Жесткая вода	-/2,29	-/56,1	0,99/6,40	< 0/84,4	1,27/-	21,1/-
Водопроводная вода	1,32/-	24/-	-/5,10	-/80,5	-/-	-/-

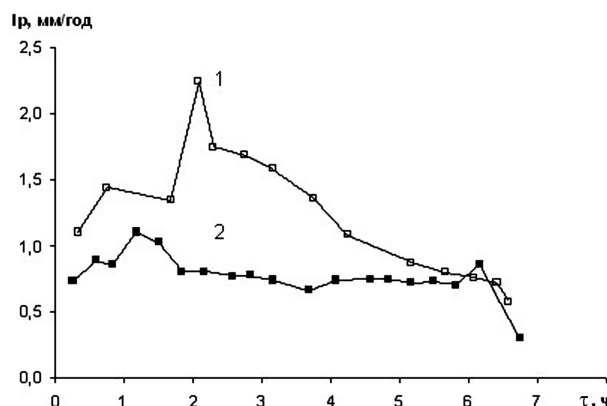


Рис. 4. Изменение скорости коррозии стали 20 в мягкой воде: 1 — при введении соли сульфата алюминия; 2 — при растворении алюминиевого анода (0,37 мА/см<sup>2</sup>).

жеобразованных ионов  $Al^{3+}$  на формирование защитных пленок является более продуктивным.

### Выводы

Коррозия малоуглеродистой стали в минерализованной воде снижается во времени вследствие образования поверхностных пленок из нерастворимых соединений, состав и защитное действие которых зависят от концентрации природных компонентов воды — солей жесткости. Анодное растворение алюминия приводит к изменению морфологии и модификации защитных слоев за счет внедрения ионов алюминия.

Переход в воду ионов алюминия при анодном растворении его в паре с катодом из нержавеющей стали способствует торможению коррозии малоуглеродистой стали в 1,5–2 раза в мягкой воде и практически не замедляет в воде с высокими жесткостью и минерализацией. Такое различие связано с конкурирующей адсорбцией ионов  $Al^{3+}$  с другими компонентами раствора, в частности, с ионами кальция и изменением состава и строения защитных слоев в зависимости от катионно-анионного состава воды.

Протекторная защита стали от коррозии в минерализованной воде с использованием алюминиевых анодов оказывается менее эффективной, чем в случае анодного растворения алюминия от внешнего источника тока. Это объясняется пассивацией алюминия и малой скоростью его растворения при образовании гальванической пары с активным катодом — корродирующей малоуглеродистой сталью.

Торможение коррозии стали в 10 раз достигается при условии ее катодной поляризации с использованием растворимого алюминиевого анода. Образованные плотные слои, содержащие гидроксид алюминия, несмотря на неравномерность структуры и состава имеют значительное последствие, сохраняя защитные свойства

при отключении поляризации и замене воды. Предложенный комплексный экологически безопасный способ противокоррозионной защиты, основанный на формировании защитных алюминиевых слоев и катодной поляризации стали, является перспективным для защиты функционирующих стальных водопроводов (с учетом степени минерализации воды).

### Список литературы

1. Гироль М.М., Гироль А.М., Хомко В.Є., Ковальський Д. Стан водопровідних мереж України та шляхи запобігання погіршенню якості питної води // Полімер. труби. — 2008. — № 3. — С. 13–22.
2. Рейзин Б.Л., Стрижевский И.В., Сазонов Р.П. Защита систем горячего водоснабжения от коррозии. — М.: Стройиздат, 1986. — 112с.
3. Герасименко Ю., Васильев Г. Магнієвий захист від корозії систем гарячого водопостачання // Електрохімічний захист і корозійний контроль. Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2007. — Спец. вип. № 6. — С. 10–15.
4. Pat. 2008013746 (A1) WO, IC<sup>8</sup> C 11 D 3/02, C 11 D 3/02. Warewashing composition for use in automatic dishwashing machines, and method for using / K.R.Smith, M.J.Bartelme, K.E.Olson. — Publ. 31.01.08.
5. Pat. 2007149431 (A1) US, IC<sup>8</sup> C 09 D 9/00, C 09 D 9/00. Warewashing composition for use in automatic dishwashing machines, and methods for manufacturing and using / S.E.Lentsch, M.J.Bartelme, V.F.Man et al. — Publ. 26.06.07.
6. ГОСТ 9.502-82. Единая система защиты от коррозии и старения. Ингибиторы коррозии металлов для водных систем. Методы коррозионных испытаний. — Введ.
7. Сухотин А.М. Физическая химия пассивирующих пленок на железе. — Л.: Химия, 1989. — 320 с.
8. Зайцева В.А., Хасан Андрес Фернандес, Зайцев Б.Е. Продукты коррозии стали 08кп при воздействии высокоминерализованных сред // Защита металлов. — 1987. — Т. 23, № 4. — С. 608–613.
9. Лапотышкина Н.П., Сазонов Р.П. Водоподготовка и водно-химический режим тепловых сетей. — М.: Энергоиздат, 1982. — 200 с.
10. Белоусова Н.А., Донченко М.И., Редько Р.М., Герасименко Ю.С. Экологически безопасные способы защиты стали от коррозии в воде. 1. Влияние минерализации воды на коррозию малоуглеродистой стали // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2010. — № 4. — С. 33–37.
11. Запольський А.К., Мішкова-Клименко Н.А., Астрелін І.М. та ін. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод: Підруч. — Київ: Лібра, 2000.
12. Краткий справочник по химии / Под. ред. О.Д.Куриленко. — Киев: Наук. думка, 1974. — 991 с.

Поступила в редакцию 29.07.10

## The Methods of Ecologically Safe Steel Protection from Water Corrosion. 2. Protective Layers Formation by Aluminum Anodic Dissolution

*Bilousova N.A., Donchenko M.I., Gerasymenko Yu.S., Redko R.M., Savorona O.M.*

*National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev*

The efficiency of low-carbon steel anticorrosive protection by protective layers modified with aluminium compounds formation during anode aluminium dissolution is investigated. The maximal corrosion inhibition (in 10 times) is achieved during steel cathodic polarization with aluminium anodic dissolution. The formed dense protective layers containing aluminium hydrate have significant aftereffect with protective properties preservation since polarization shut-down and water substitution.

**Key words:** corrosion rate, aluminium anodic dissolution, aluminium protector, cathodic polarization, polarization resistance method.

Received July 29, 2010

УДК 620.193-197: 504.064

## Підвищення експлуатаційної надійності та екологічної безпеки трубопровідного транспорту

*Старчак В.Г.<sup>1</sup>, Олексієнко С.О.<sup>2</sup>, Іваненко К.М.<sup>2</sup>, Мачульський Г.М.<sup>1</sup>, Поліщук Т.М.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Чернігівський національний педагогічний університет

<sup>2</sup> Чернігівський державний технологічний університет

Выполнена корреляция между показателями физико-химических явлений на поверхности, в поверхностном слое и объеме металла и характеристиками синергистов. На основе показателей корреляции разработаны активные синергические металлохелатирующие композиции для поверхностной модификации стали с учетом химической природы неметаллических включений. Использование композиций повышает долговечность, эксплуатационную надежность и экологическую безопасность трубопроводного транспорта с получением экономии энерго- и материальных ресурсов.

**Ключевые слова:** статические малоцикловые нагрузки, неметаллические включения, поверхностная модификация, синергичные добавки, металлохелатирование.

Виконано кореляцію між показниками фізико-хімічних явищ на поверхні, у поверхневому шарі та об'ємі металу та характеристиками синергістів. На основі показників кореляції розроблено активні синергічні металлохелатуючі композиції для поверхневої модифікації сталі з урахуванням хімічної природи неметалевих включень. Використання композицій підвищує довговічність, експлуатаційну надійність та екологічну безпеку трубопровідного транспорту з одержанням економії енерго- та матеріальних ресурсів.

**Ключові слова:** статичні малоциклові навантаження, неметалеві включення, поверхнева модифікація, синергічні добавки, металлохелатування.

Експлуатаційна надійність та екологічна безпека металоконструкцій, зокрема трубопровідного транспорту, в агресивних технологічних та природних середовищах, забруднених викидами, скидами, відходами виробництв, визначається ефективністю інженерно-технічних природоохоронних

заходів [1–5] та раціональним вибором сталі (як основного конструкційного матеріалу XXI ст.) за хімічним складом та за хімічною природою неметалевих включень (НМВ) [6–10].

На території Чернігівської обл. розташовано 697 потенційно небезпечних об'єктів, функціонує