

А. Э. НАРИВСКИЙ¹, Г.Ш. ЯР-МУХАМЕДОВА²¹ ЧАО «Азовский машиностроительный завод», Бердянск, Украина, zaoamz@yandex.ru² Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, gulmira-alma-ata@mail.ru,

ПИТТИНГОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ AISI 321 В НИЗКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ХЛОРИДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ В НЕЙ δ -ФЕРРИТА

В статье представлены результаты исследования влияния δ -феррита в стали AISI 321 на ее питтингостойкость в модельных оборотных водах, применяемых при эксплуатации теплообменного оборудования. Показано, что в нейтральных хлоридсодержащих растворах критическая температура питтингообразования (КТП) стали AISI 321 прямо пропорционально снижается при увеличении в ней объема δ -феррита. В слабокислых модельных оборотных водах с концентрацией хлоридов 600, 550, 500 мг/дм³, а также в хлоридсодержащих растворах с концентрацией хлоридов 350,400 мг/дм³ между КТП стали AISI 321 и объемом в ней δ -феррита установлены параболические зависимости, свидетельствующие о неоднозначном влиянии δ -феррита на питтингостойкость стали. В высокоокислительных хлоридсодержащих средах, которые образуются на поверхности теплообменной аппаратуры под осадком из оборотной воды, потенциалы активации, репассивации стали AISI 321 сдвигаются в область отрицательных значений, а $\Delta\phi$ -критерий возрастает при увеличении в ней объема δ -феррита. Наиболее вероятно δ -феррит в высокоокислительных хлоридсодержащих средах катодно защищает сталь AISI 321 и, таким образом, увеличивает ее питтингостойкость.

Ключевые слова: δ -феррит, хлоридсодержащая среда, критическая температура питтингообразования, электрохимический потенциал

Введение. Для качественной оценки коррозионной стойкости металлов в растворах электролитов существует достаточное количество методов. При этом все известные методы определения склонности коррозионностойких сталей к питтинговой и щелевой коррозии Розенфельд И.Л. [1] разделяет на две группы: электрохимические и химические. Однако в условиях эксплуатации теплообменной аппаратуры часто встречаются среды с низкой удельной проводимостью, затрудняющие оценку питтингостойкости конструкционных материалов электрохимическими методами. Поэтому для определения питтингостойкости материалов теплообменного оборудования в оборотных водах применяют метод определения критической температуры питтингообразования (КТП) сталей и сплавов [2; 3]. Так в работах [4-8] определяли КТП коррозионностойких сталей и сплавов в модельных оборотных водах в зависимости от их химического состава и структурной гетерогенности (средний диаметр зерна аустенита и объем включений). Однако коррозионностойкие стали аустенитного класса содержат δ -феррит. Известно [1; 9-12], что ферритная фаза снижает питтингостойкость коррозионностойких сталей в хлоридсодержащих средах, а границы между аустенитной и ферритной фазами часто являются местами зарождения и распространения коррозионных тре-

щин. Эти данные позволяют качественно оценить влияние ферритной фазы на питтингостойкость коррозионностойких сталей в высокоминерализованных хлоридсодержащих средах, но фактически не пригодны для количественной оценки этого процесса, потому что нет зависимости между критериями питтингостойкости коррозионностойких сталей, параметрами среды и количеством в них δ -феррита. Поэтому в работе исследовано влияние количества δ -феррита в стали AISI 321 на ее КТП и потенциалы в модельных оборотных водах.

Материалы и методы исследований. Предыдущими магнетометрическими исследованиями показана возможность идентификации излишних структурных составляющих твердого раствора коррозионностойких сталей в легированном аустените. В результате этого авторам удалось не только зарегистрировать зарождение небольшого количества δ -феррита, но и определить степень стабильности аустенит-матрица [13].

В работе исследовали пять плавок стали AISI 321. Химический состав и структурную гетерогенность, критические температуры питтингообразования, потенциалы активации, репассивации, свободной коррозии, $\Delta\phi$ – критерий и скорость коррозии в хлоридсодержащих средах определяли ранее [4; 7; 8]. Для определения

содержания δ -феррита в стали AISI 321 применяли интегральный метод идентификации α – фазы [14]. Образцы изготавливали холодным механическим способом в форме прямоугольных параллелепипедов размером 3х3х1 мм, поверхность которых подвергали электрополировке. Количество ферритной фазы определяли по формуле:

$$P_{\alpha} = \frac{\sigma_m}{\sigma_{\alpha}} \cdot 100\% = \frac{[\chi - \chi_{\infty}] \cdot H}{\sigma_{\alpha}} \cdot 100\% = \frac{[\chi - (\chi_0 - \chi_p)] \cdot H}{\sigma_{\alpha}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где σ_{α} – удельная намагниченность α – фазы; σ_m – ферромагнитная составляющая удельной намагниченности образца; χ – общая удельная магнитная проницаемость образца; χ_{∞} – результирующая удельная магнитная проницаемость χ_0 аустенита и паропроцесса χ_p α – фазы; H – напряженность магнитного поля.

Корреляционным, дисперсионным и регрессионным анализом, применяя метод наименьших квадратов [15], устанавливали прямолинейные аналитические зависимости (2; 3):

$$КТП = a \pm b P_{\alpha}; \quad (2)$$

$$\varphi_1 = a \pm b P_{\alpha}; \quad (3),$$

где КТП – критическая температура питтингообразования, °С; a ; b – коэффициенты; P_{α} – количество ферритной фазы, об. %; φ_1 – потенциал активации стали, мВ.

Результаты исследований и их обсуждение.

В результате электромагнитного насыщения образцов по формуле (1) вычислено содержание δ -феррита в пяти плавках стали AISI 321. Содержание δ -феррита изменялось от 0,099 (плавка 4) до 0,36 об. % (плавки 2; 3). Содержание δ -феррита в стали AISI 321 влияет на ее питтингоустойчивость в низкоминерализованных хлоридсодержащих средах. Так, показано, что в хлоридсодержащем растворе с pH 4 и концентрацией хлоридов 600 мг/дм³ между КТП стали AISI 321 и содержанием в ней δ -феррита имеет место параболическая зависимость (рисунок 1, а). При увеличении содержания δ -феррита от 0,099 до 0,24 об. % КТП стали возрастает до 50,5 °С, а при последующем увеличении объема δ -феррита до 0,36 об. % КТП стали снижается до 44 °С.

В хлоридсодержащих растворах с pH 5; 6; 7; 8 и концентрацией хлоридов 600 мг/дм³ корреляционным и регрессионным анализом между КТП стали AISI 321 и содержанием в ней δ -феррита установлена прямолинейная корреляция с коэффициентами $r = -0,86; -0,87; -0,91; -0,94$.

Кроме того установлено, что КТП стали AISI 321 по прямолинейной закономерности снижается при увеличении в ней содержания δ -феррита (рисунок 1 б-д) (4-7):

$$КТП = 52,91 - 24,7 P_{\alpha}; r_1 = -0,86 \quad (4)$$

$$КТП = 56,02 - 19,7 P_{\alpha}; r_1 = -0,87 \quad (5)$$

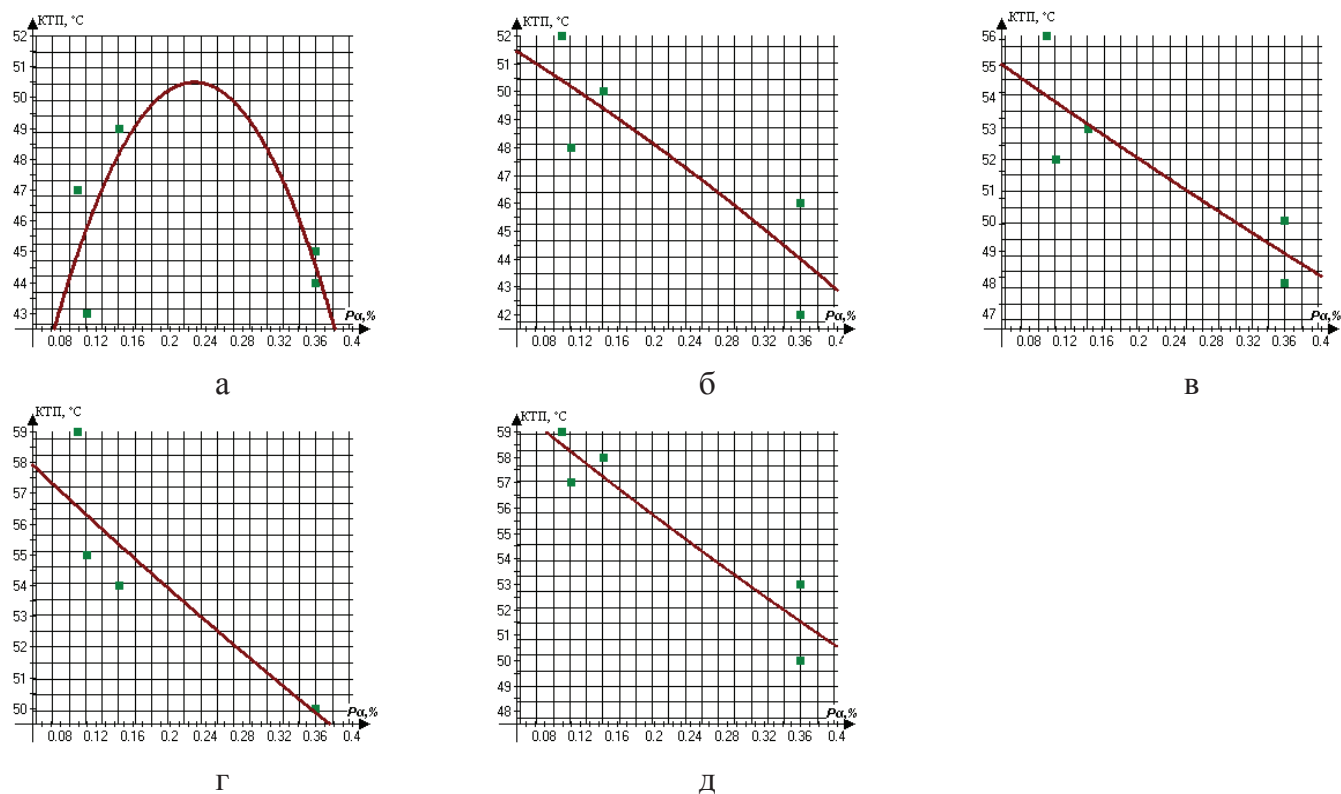
$$КТП = 59,15 - 25,8 P_{\alpha}; r_1 = -0,91 \quad (6)$$

$$КТП = 66,11 - 26,6 P_{\alpha}; r_1 = -0,94 \quad (7)$$

Значимость вышеуказанных коэффициентов корреляции между величинами уравнений (4-7) оценена по t – критерию Стьюдента с уровнем значимости 0,10. Значит уравнения (4-7) адекватно описывают изменение КТП исследуемой стали в зависимости от содержания в ней δ -феррита. Полученные закономерности согласуются с данными [1], потому что в обоих случаях питтингоустойчивость исследуемых сталей снижается при увеличении в них содержания ферритной фазы. Имеются данные [4; 7; 8; 16-20], что структурная гетерогенность уменьшает питтингоустойчивость коррозионноустойчивых сталей в хлоридсодержащих растворах. Последнее связывают как с уменьшением перенапряжения кислорода на вторичной фазе, так и с уменьшением защитных свойств оксидной пленки на границах раздела фаз. Однако в слабокислом хлоридсодержащем растворе с pH 4 и концентрацией хлоридов 600 мг/дм³ возрастание КТП стали AISI 321 при увеличении в ней δ -феррита от 0,099 до 0,24 об. % вероятно обусловлено тем, что δ -феррит катодно защищает сталь.

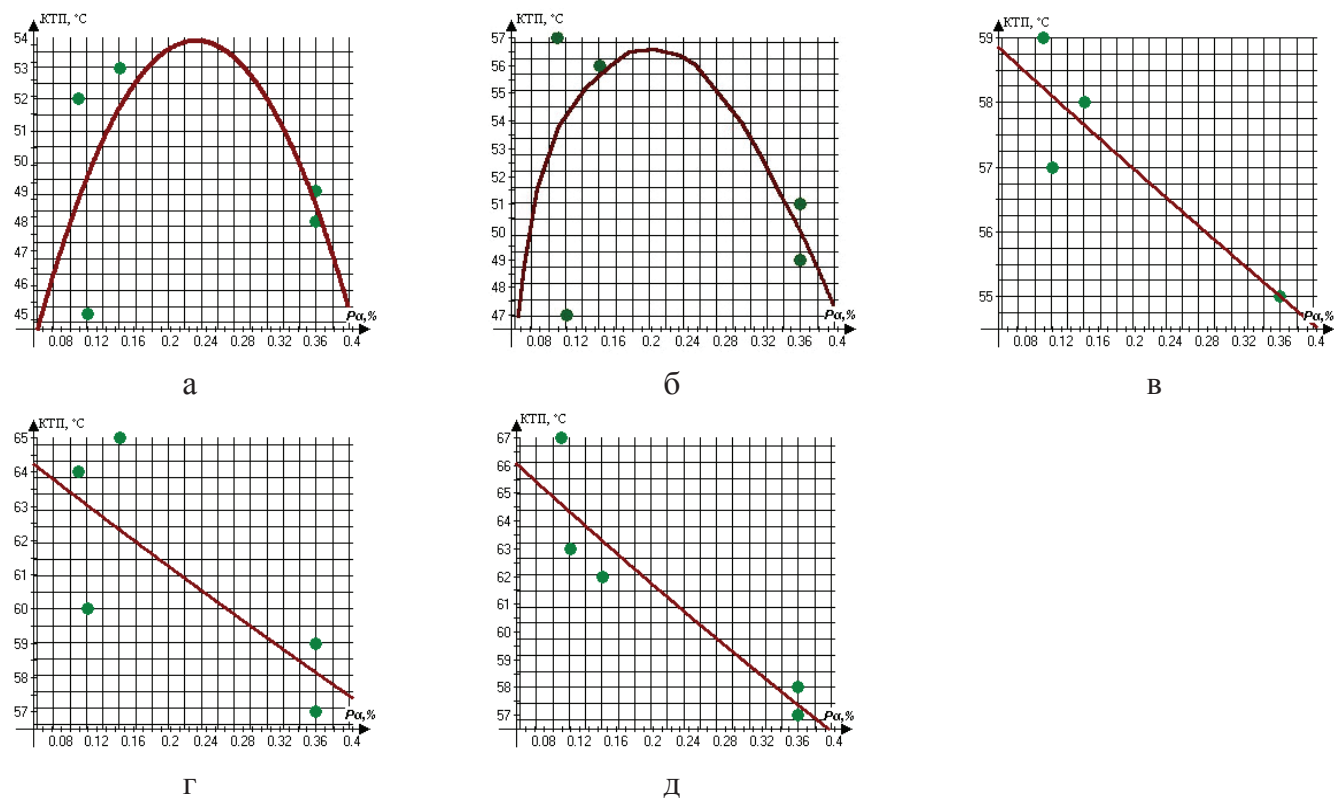
Последующее увеличение δ -феррита в исследуемой стали до 0,36 об. % способствует снижению ее КТП. Вероятно такая закономерность обусловлена тем, что возрастание объема δ -феррита в стали от 0,24 до 0,36 об. % происходит в результате увеличения размеров его включений. В результате этого некогерентность между кристаллическими решетками аустенитной и ферритной фазы способствует снижению КТП стали AISI 321 в слабокислом хлоридсодержащем растворе с pH 4 и концентрацией хлоридов 600 мг/дм³.

В слабокислых хлоридсодержащих растворах с pH 4; 5 и концентрацией хлоридов 550 мг/дм³ между КТП стали AISI 321 и объемом в ней δ -феррита установлена параболическая зависимость (рисунок 2 а, б). Так в хлоридсодержащем растворе с pH 4, 5 КТП исследуемой стали возрастает при увеличении в ней объема δ -феррита от 0,099 до 0,23 об. %. Последующее увеличение в ней объема δ -феррита до 0,36 об. % способствует снижению КТП. В нейтральных хлоридсодержащих растворах с pH 6; 7; 8 и концентрацией хлоридов 550 мг/дм³ между



Значения pH: а - 4; б - 5; в - 6; г - 7; д - 8

Рисунок 1 - Критическая температура питтингообразования стали AISI 321 в зависимости от содержания в ней δ -феррита в хлоридсодержащих растворах с концентрацией хлоридов 600 мг/дм³



Значения pH: а - 4; б - 5; в - 6; г - 7; д - 8

Рисунок 2 - Критическая температура питтингообразования стали AISI 321 в зависимости от содержания в ней δ -феррита в хлоридсодержащих растворах с концентрацией хлоридов 550 мг/дм³

КТП стали AISI 321 и объемом в ней δ -феррита установлена прямолинейная регрессионная зависимость (рисунок 2 в-д). Так, КТП исследуемой стали по прямолинейной закономерности снижается при увеличении в ней объема δ -феррита от 0,099 до 0,36 об. % (8-10).

$$\text{КТП} = 59,45 - 12,35 P_{\alpha}; r_1 = -0,92 \quad (8)$$

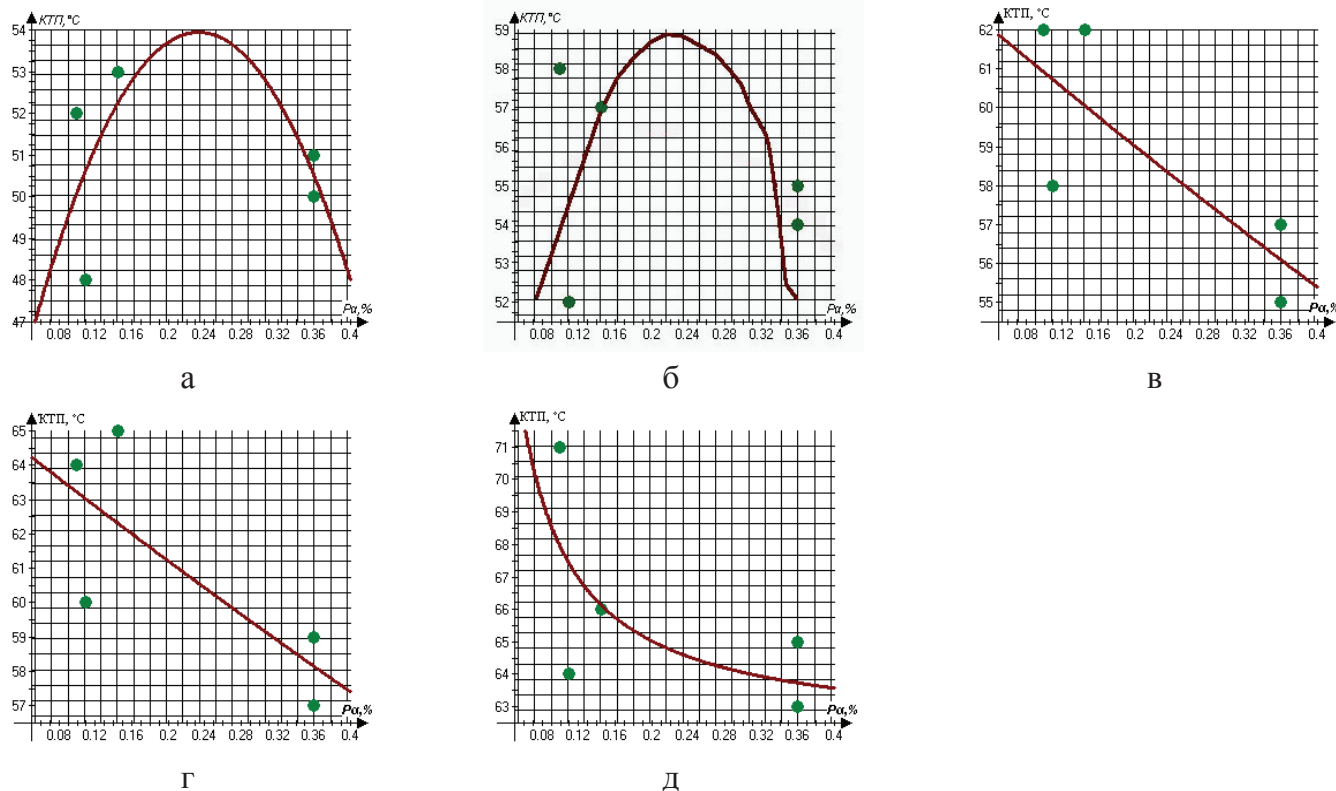
$$\text{КТП} = 65,19 - 19,51 P_{\alpha}; r_1 = -0,87 \quad (9)$$

$$\text{КТП} = 67,38 - 27,0 P_{\alpha}; r_1 = -0,92 \quad (10)$$

Значимость коэффициентов корреляции $r_1 = -0,92$; $-0,87$; $-0,92$ между КТП стали AISI 321 и объемом δ -феррита оценена по t – критерию Стьюдента с уровнем значимости 0,10. Таким образом, в хлоридсодержащих растворах с pH 6; 7; 8 и концентрацией хлоридов 550 мг/дм³ уравнения (8-10) адекватно описывают изменение КТП стали AISI 321 в зависимости от объема в ней δ -феррита. Анализ первых производных уравнений (8-10) показал, что интенсивность снижения КТП стали AISI 321 при увеличении в ней объема δ -феррита возрастает при увеличении pH хлоридсодержащего раствора от 6 до 8. Таким образом, при повышении pH хлоридсодержащего раствора от 6 до 8 возрастает КТП исследуемой стали и, в тоже время, этот критерий

снижается при увеличении в ней δ -феррита. Из анализа коэффициентов (а) уравнений (8; 9) следует, что КТП стали AISI 321 возрастает на 5, 7 °C при увеличении pH хлоридсодержащего раствора от 6 до 7 и на 2,2 °C при увеличении pH от 7 до 8. В тоже время в соответствии с данными уравнений (9; 10) в хлоридсодержащем растворе с pH 6 КТП исследуемой стали снижается на 4,4 °C при объеме δ -феррита 0,36 об. %, а в хлоридсодержащем растворе с pH 7 и 8 соответственно на 7,0 и 10,0 °C. Значит при повышении pH хлоридсодержащего раствора на защитные свойства оксидной пленки на поверхности стали AISI 321 больше влияет содержание в ней δ -феррита, чем другие параметры. Например, влияет изменение ее химического состава в пределах стандарта, а также повышение растворимости кислорода в хлоридсодержащем растворе. Имеются данные [11], что при повышении температуры хлоридсодержащего раствора возрастает пористость оксидной пленки на поверхности коррозионностойкой стали. Последнее способствует интенсивной адсорбции ионов хлора в порах оксидной пленки и зарождению, а также, при благоприятных условиях [12], развитию питтингов.

Таким образом, при повышении pH хлоридсодержащего раствора возрастает растворимость



Значения pH: а - 4; б - 5; в - 6; г - 7; д - 8

Рисунок 3 - Критическая температура питтингообразования стали AISI 321 в зависимости от содержания в ней δ -феррита в хлоридсодержащих растворах с концентрацией хлоридов 550 мг/дм³

кислорода, который «залечивает» поры в оксидной пленке на поверхности стали AISI 321, но, в тоже время, при повышении в стали объема δ -феррита на включениях этой фазы понижается перенапряжение кислорода, т.е. возрастает ток катодной и, соответственно, анодной реакции.

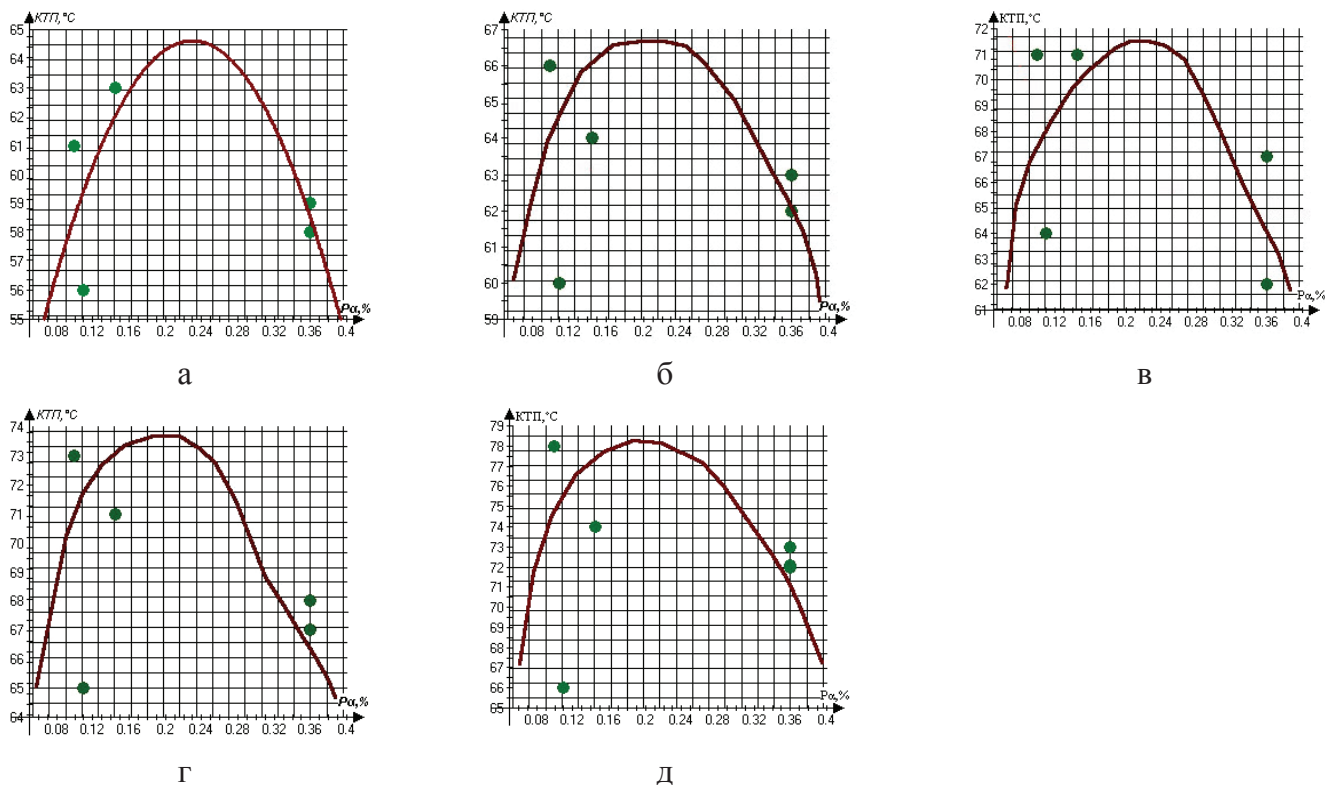
В хлоридсодержащих растворах с pH 4; 5 и концентрацией хлоридов 500 мг/дм³ между КТП стали AISI 321 и объемом в ней δ -феррита установлена параболическая зависимость (рисунок 3 а; б), а в хлоридсодержащих растворах с pH 6; 7 прямолинейная (рисунок 3 в; г). В частности, в хлоридсодержащих растворах с pH 6; 7 и концентрацией хлоридов 500 мг/дм³ КТП стали AISI 321 по прямолинейной закономерности снижается при увеличении в ней объема δ -феррита (11; 12).

$$\text{КТП} = 62,78 - 18,52 P_{\alpha}; r_1 = -0,79 \quad (11)$$

$$\text{КТП} = 65,19 - 19,50 P_{\alpha}; r_1 = -0,77 \quad (12)$$

Значимость коэффициентов корреляции r_1 = -0,79; -0,77 между параметрами уравнений (11; 12) оценена по t – критерию Стьюдента с уровнем значимости 0,10. Таким образом, уравнения (11; 12) адекватно описывают изменение КТП стали AISI 321 в зависимости от объема в ней δ -феррита. Анализ первых производных уравнений (11; 12) показал,

что в хлоридсодержащем растворе с pH 7 КТП стали AISI 321 интенсивней снижается при увеличении в ней объема δ -феррита, чем в хлоридсодержащем растворе с pH 6. Анализируя коэффициенты (а) уравнений (11; 12) и максимально возможные изменения КТП стали AISI 321 в хлоридсодержащих растворах с pH 6; 7 можно отметить, что КТП исследуемой стали при повышении pH раствора возрастает на 2,4 °С, а при повышении в ней содержания ферритной фазы до 0,36 об. % и повышении pH раствора от 6 до 7 понижается на 0,35 °С. Таким образом, повышение КТП стали AISI 321 при увеличении pH хлоридсодержащего раствора от 6 до 7 больше обусловлено интенсификацией процесса «залечивания» пор в оксидной пленке на поверхности стали при возрастании концентрации кислорода в растворе, чем понижением его перенапряжения на δ -феррите при повышении его объема в стали. Следует отметить, что в хлоридсодержащем растворе с концентрацией хлоридов 550 мг/дм³ установлены противоположные закономерности. Значит негативное влияние δ -феррита на устойчивость коррозионно стойких сталей больше проявляется в высокоминерализованных нейтральных хлоридсодержащих растворах. Последнее согласуется с известными данными [1; 9-12]. Необходимо отметить тенденцию,



Значения pH: а - 4; б - 5; в - 6; г - 7; д - 8

Рисунок 4 - Критическая температура питтингообразования стали AISI 321 в зависимости от содержания в ней δ -феррита в хлоридсодержащих растворах с концентрацией хлоридов 400 мг/дм³

когда в хлоридсодержащих растворах с pH 8 и концентрацией хлоридов 600; 550 мг/дм³ между КТП стали AISI 321 и объемом в ней δ -феррита установлены прямолинейные регрессионные зависимости (рисунок 1 д; 2 д), а в хлоридсодержащем растворе с pH 8 и концентрацией хлоридов 500 мг/дм³ гиперболическая (рисунок 3 д). При этом КТП стали AISI 321 наиболее интенсивно снижается при увеличении в ней объема δ -феррита в интервале от 0,099 до 0,145 об. %. Последующее увеличение объема δ -феррита в стали способствует незначительному снижению ее КТП.

В хлоридсодержащем растворе с pH 4...8 и концентрацией хлоридов 400 мг/дм³ между КТП стали AISI 321 и объемом в ней δ -феррита установлена параболическая зависимость (рисунок 4а).

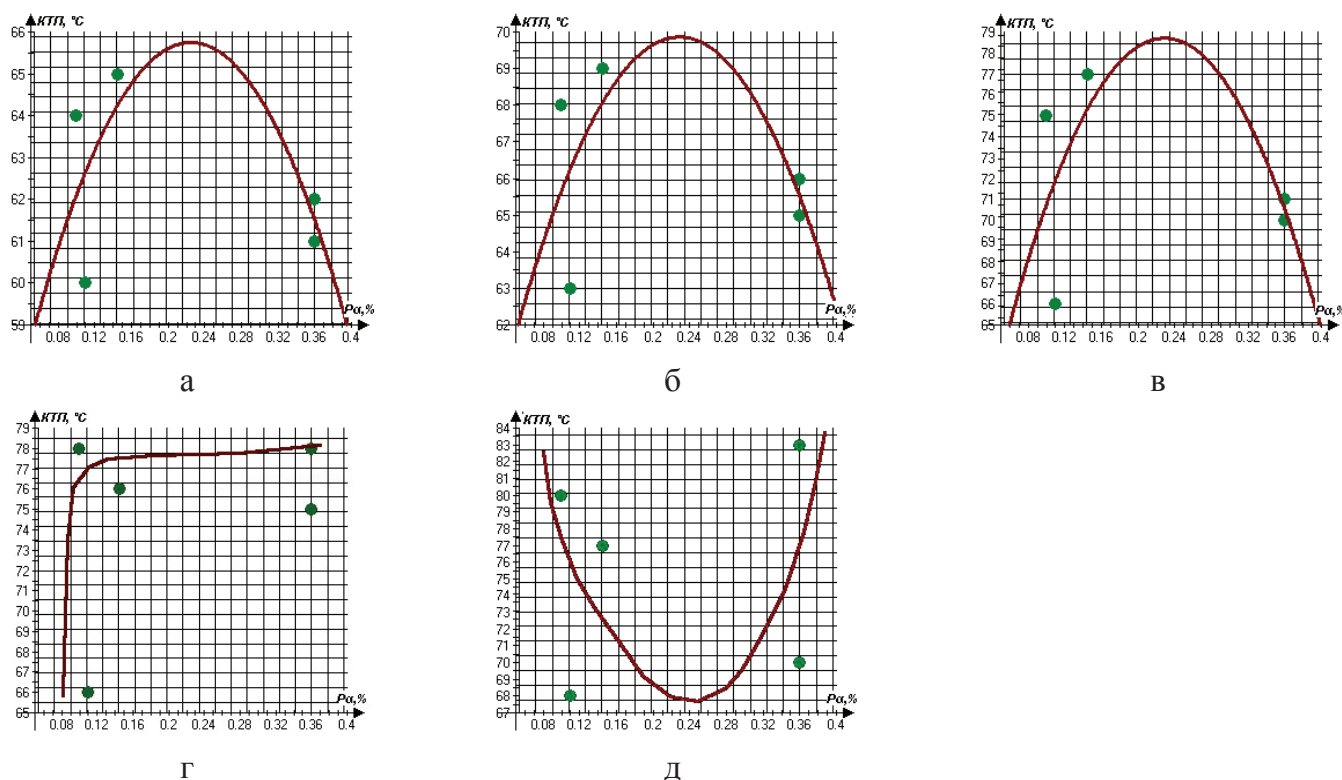
При этом увеличение объема δ -феррита в стали от 0,099 до 0,24 об. % способствует возрастанию ее КТП. Последующее увеличение объема δ -феррита в стали AISI 321 инициирует снижение ее КТП.

В низкоминерализованных хлоридсодержащих растворах с pH 4; 5; 6; 8 и концентрацией хлоридов 350 мг/дм³ между КТП стали AISI 321 и объемом в ней δ -феррита установлена параболическая зависимость (рисунок 5 а-в, д). Однако в нейтраль-

ном хлоридсодержащем растворе с pH 7 и концентрацией хлоридов 350 мг/дм³ КТП стали возрастает при увеличении в ней объема δ -феррита по гиперболической зависимости (рисунок 5 г)

Оборотные воды, применяемые при эксплуатации теплообменного оборудования, часто являются нейтральной средой с концентрацией хлоридов до 350 мг/дм³ [8; 16]. Поэтому с этой точки зрения питтингостойкость материалов теплопередающих элементов оборудования в оборотной воде можно повысить, увеличив в них объем δ -феррита. В коррозионностойких сталях аустенитного класса содержание ферритной фазы повышают пластической деформацией или термообработкой. Однако при эксплуатации теплообменного оборудования на его поверхности может образоваться накипь и накапливаться осадок из оборотной воды, в котором возрастает концентрация хлоридов и снижается pH [8; 16]. Такая тенденция при достаточно высоком объеме δ -феррита в стали AISI 321 способствует интенсивному снижению ее КТП и, соответственно, питтингостойкости (рисунок 1; 2; 3 а-в).

Вероятно мелкодисперсионные включения δ -феррита в сталях аустенитного класса находятся на границе неметаллических включений с



Значения pH: а - 4; б - 5; в - 6; г - 7; д - 8

Рисунок 5 - Критическая температура питтингообразования стали AISI 321 в зависимости от содержания в ней δ -феррита в хлоридсодержащих растворах с концентрацией хлоридов 350 мг/дм³

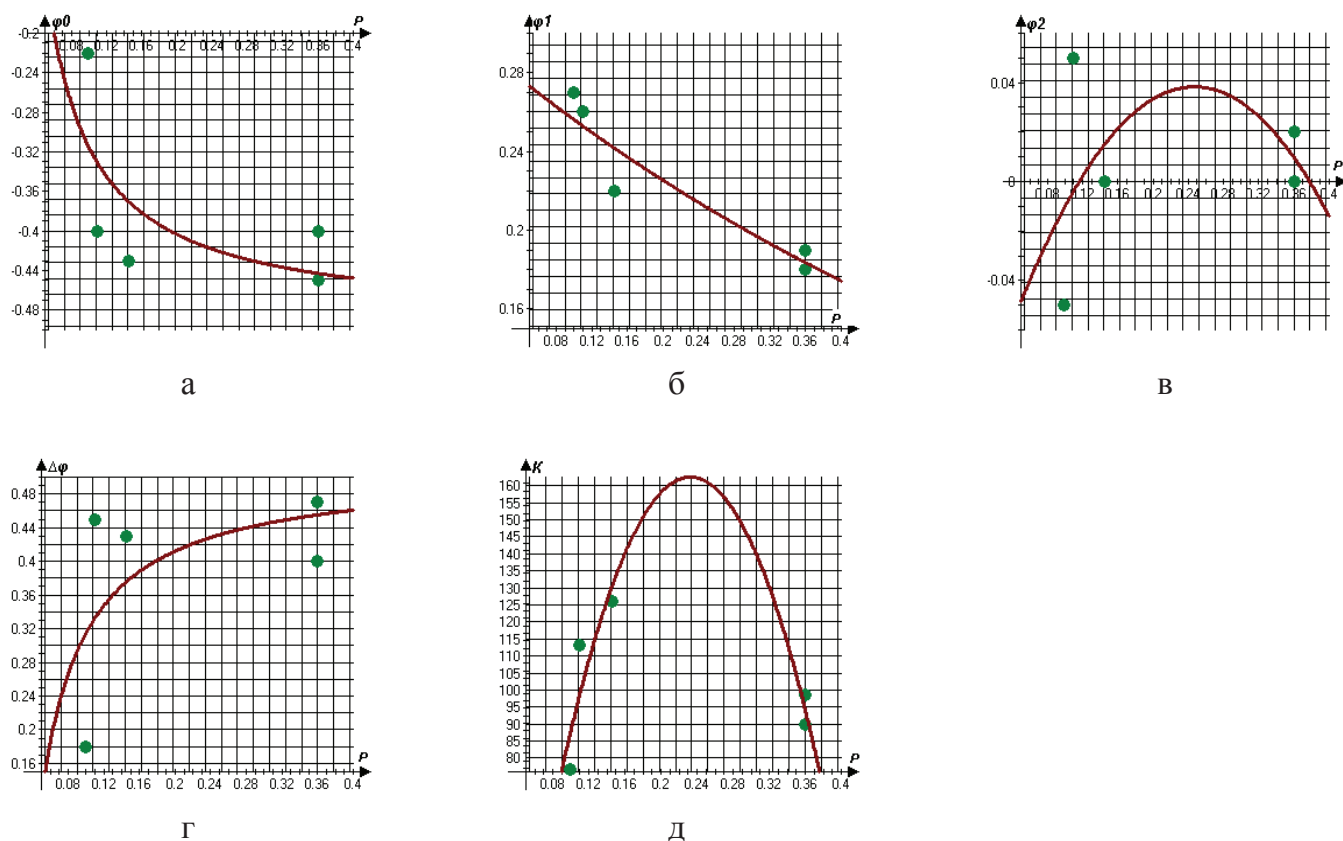
аустенитной матрицей. Незначительный объем δ -феррита в стали в слабокислых растворах с достаточно высокой концентрацией хлоридов повышает защитные свойства оксидной пленки на границах между включением и матрицей (рисунок 1 а; 2; 3 а, б). Однако последующее увеличение объема δ -феррита до 0,36 об. % вероятно увеличивает ширину прослойки δ -феррита между включением и аустенитной матрицей, на которой при более низкой температуре раствора адсорбируются хлориды, способствующие активации стали. Это предположение подтверждается тем, что в средах с высоким окислительно-восстановительным потенциалом сталь AISI 321 локально активируется при увеличении в ней δ -феррита. Установлено, что потенциал активации стали AISI 321 по прямолинейной закономерности снижается при увеличении в ней объема δ -феррита (13) (рисунок 6 б).

$$\varphi_1 = 0,285 - 0,282 P_{\delta}; r_1 = -0,93 \quad (13)$$

Значимость коэффициента корреляции $r_1 = -0,93$ между потенциалом активации φ_1 и объемом δ -феррита в стали AISI 321 оценена по t -критерию Стьюдента с уровнем значимости 0,10. Значит

уравнение (13) адекватно описывает изменение потенциала активации стали AISI 321 в зависимости от объема δ -феррита. Аналогичная закономерность установлена между потенциалом активации стали AISI 321 и объемом в ней оксидов [8]. Кроме того показано [8], что потенциал активации стали AISI 321 несколько смещается в отрицательную сторону при увеличении в ней объема нитридов титана.

О негативном влиянии включений на потенциал активации коррозионностойких сталей в хлоридсодержащих средах с высоким окислительно-восстановительным потенциалом указывал Я.М. Колотыркин [18; 19] и Л.И. Фрейман [20]. Однако в этих работах нет информации о том, что при незначительном объеме δ -феррита в сталях аустенитного класса потенциал свободной коррозии интенсивно сдвигается в отрицательную (рисунок 6 а), а потенциал репассивации (рисунок 6 б) в положительную сторону. В результате этого в хлоридсодержащих средах с высоким окислительно-восстановительным потенциалом скачкообразно повышается $\Delta \varphi$ – критерий и, соответственно, питтингостойкость стали AISI 321 при увеличении в ней объема δ -феррита от 0,099 до 0,24 об. % (рисунок 6 г). Наиболее вероятно,



а - потенциал свободной коррозии; б - потенциал активации; в - потенциал репассивации; г - $\Delta \varphi$ -критерий; д - скорость коррозии стали AISI 321

Рисунок 6 - Потенциалы в зависимости от содержания в ней δ -феррита

что вышеуказанные процессы обусловлены тем, что при таком объеме δ -феррита в стали его прослойка между включениями и аустенитной матрицей незначительна. В результате этого в хлоридсодержащих средах с высоким окислительно-восстановительным потенциалом эта прослойка вытравливается, увеличивая коррозионные потери стали (рисунок 6 д), а поверхность стали между включением и аустенитной матрицей приобретает «ювенильный» характер. Наиболее вероятно процессы репассивации питтингов по приведенному выше механизму происходят на границе между нитридами титана с аустенитной матрицей, потому что закономерности между потенциалами репассивации, свободной коррозии и содержанием в стали нитридов титана и δ -феррита имеют аналогичный характер.

При объеме δ -феррита в стали AISI 321 в интервале от 0,24 до 0,36 об. % ее $\Delta \varphi$ – критерий также возрастает (рисунок 6 г), но не так интенсивно, потому что потенциал ее репассивации несколько сдвигается в отрицательную сторону (рисунок 6 в), а потенциал свободной коррозии хотя и снижается, но не так интенсивно (рисунок 6 г). Кроме того, в этих условиях коррозионные потери стали AISI 321 существенно снижаются. Вероятно это обусловлено тем, что при таком объеме δ -феррита в стали AISI 321 его прослойка между нитридами титана и аустенитной матрицей имеет достаточные размеры, препятствующие ее вытравливанию. К тому же, вполне вероятно при таких размерах эта фаза катодно защищает поверхность стали в хлоридсодержащей среде.

Выводы. В высокоминерализованных нейтральных хлоридсодержащих растворах с концентрацией хлоридов 500; 550; 600 мг/дм³ между КТП стали AISI 321 и содержанием в ней δ -феррита установлены прямолинейные регрессионные зависимости. При этом КТП стали снижается при увеличении в ней объема δ -феррита. Аналогичная закономерность установлена между потенциалом активации стали AISI 321 и объемом в ней δ -феррита. Вероятно, что в нейтральных высокоминерализованных хлоридсодержащих растворах на границах раздела между аустенитной матрицей и δ -ферритом интенсивно адсорбируются ионы хлора, способствующие активации стали. При этом чем больше объем δ -феррита в стали, тем интенсивней адсорбируются хлориды и КТП стали снижается.

Показано, что в хлоридсодержащих средах с высоким окислительно-восстановительным потенциалом питтингостойкость стали AISI 321 возрастает при увеличении в ней объема δ -феррита, потому что потенциал ее репассивации сдвигается в поло-

жительную сторону при объеме δ -феррита до 0,24 об. %, а потенциал свободной коррозии по гиперболической зависимости сдвигается в отрицательную сторону. В результате последнего $\Delta \varphi$ – критерий стали AISI 321 по гиперболической зависимости возрастает при увеличении в ней объема δ -феррита.

Таким образом, δ -феррит в стали AISI 321 при объеме до 0,24 об. % повышает ее питтингостойкость в хлоридсодержащих средах в широком интервале окислительно-восстановительных потенциалов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. М.:Металлургия, 1970.-448 с.
- 2 Герасимов В.В. Прогнозирование коррозии металлов. М.: Металлургия, 1989.-151 с.
- 3 Сахненко Н.Д., Капустенко П.А., Ведь М.В., Желавский С.Г. Изучение склонности нержавеющей сталей к питтинговой коррозии в системах горячего водоснабжения // Журнал прикладной химии. – 1998.- №1.- С.80-83.
- 4 Наривский А.Э. Влияние гетерогенности стали AISI 321 на ее питтингообразование в хлоридсодержащих средах // Физико-химическая механика материалов. -2007.-№2-С.100-106.
- 5 Наривский А.Э., Беликов С.Б. Определение питтингостойкости стали AISI 304 в хлоридсодержащей среде, присутствующей в работе теплообменников // Физико-химическая механика материалов.-2006.- № 5.-С. 316-320.
- 6 Наривский А.Э. Критерии оценки питтингостойкости нержавеющей сталей AISI 304, 08X18H10, используемых в производстве пластинчатых теплообменников /А.Э. Наривский. С.Б. Беликов// Физико-химическая механика материалов.-2007.- специальный выпуск № 6.-с.172-177.
- 7 Наривский А.Э., Беликов С.Б. Влияние неметаллических включений на электрохимические показатели стали AISI 321 в хлоридсодержащих средах// Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: Сб. докладов 8-го Междунар. Конгресса. -2007.- Т. II - С.132-135.
- 8 Наривский А.Э. Коррозионно-электрохимическое поведение конструкционных материалов для пластинчатых теплообменников в модельных оборотных водах: Автореф.... канд. тех. наук: 05.17.14.-Львов, 2009 - 18 с.
- 9 Garfias-Mesias L.F., Sykes J.M., Garfias L.F., Tuci C.D. The effect of phase compositions on the pitting corrosion of 25 Gr duplex stainless steel in chloride solutions // Corros.Sci.-1996.-38, № 8.-P.1319-1330.
- 10 Chattoraj I., Bhattamishra A.K., Jana S., Das S.K., Chakraborty S.P., De P.K. The association of, potentiokinetic reactivation and electrochemical pitting tests on a nitrogen bearing 19 Gr – 17 Mn steel with its thermal history // Corros. Sci.-1996.-38, № 6.-P.957-969.
- 11 Vorster S.W. The pitting corrosion of stainless steels containing sigma phase//Eurocorr 96: Pap. present. Sess. 8. Nice, 1996. – p.181.

12 Narajima M., Keiro T., Akatsuka Y. Nihon kikai gakkai ronbunchu/, asuhisa //A. Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. A.-1997.- 63, № 607, - P. 487-492.

13 Міщенко В.Г., Сніжний Г.В., Сніжний В.Л. Розвиток гетерогенності структури корозійностійких сталей реакторів після експлуатації // Строительство, материаловедение, машиностроение. Стародубовские чтения 2009: Сб. научных трудов. – 2009.-С.152-156.

14 Снежной Г.В., Мищенко В.Г., Снежной В.Л. Интегральный физический метод идентификации α -фазы в аустенитных хромоникелиевых сталях // Литье и металлургия.-2009.-№3 (52).-С.241-244.

15 Данко П.Е., Попов А.Г. Высшая математика в упражнениях и задачах. - М.: Высшая школа., 1986.-415с.

16 Наривский А.Э. Коррозионное разрушение пластинчатых теплообменников//Физико-химическая механика материалов. -2005.-№ 1.-С.104-108.

17 Наривский А.Э. Микромеханизм коррозионного разрушения пластин теплообменников// Физико-химическая механика материалов.- 2007.-№1.-С.110-116.

18 Колотыркин Я.М. Успехи и задачи развития теории коррозии // Защита металлов.-1980.-Т.16., № 6.-С.660-673.

19 Колотыркин Я.М. Электрохимические аспекты коррозии металлов // Защита металлов.-1975.-Т.11, № 16.-С.675-686.

20 Фрейман Л.И., Реформатская И.И. Взаимосвязь влияния легирующих элементов и сульфидных включений на пассивируемость и питтингостойкость нержавеющей сталей // Защита металлов.-1991.-Т.27, № 4.-С.617-625.

REFERENCES

1 Rozenphel'd I.L. Korroziya i zashchita metallov. M: Metallurgiya, 1970. 448 (in Russ.).

2 Gerasimov V.V. Prognozirovanie korrozii metallov. M: Metallurgiya, 1989. 151 (in Russ.).

3 Sakhnenko N.D., Kapustenko P.A., Ved' M.V., Zhelavskij S.G. Zhurnal prikladnoj khimii. 1998.1. 80-83 (in Russ.).

4 Narivskiy A.Eh. Phiziko-khimicheskaya mekhanika materialov. 2007. 2. 100-106 (in Russ.).

5 Narivskiy A.Eh., Belikov S.B. Phiziko-khimicheskaya mekhanika materialov. 2006. 5. 316-320 (in Russ.).

6 Narivskiy A.Eh. Phiziko-khimicheskaya mekhanika materialov. 2007. 6. 172-177 (in Russ.).

7 Narivskiy A.Eh., Belikov S.B. Oborudovanie i tekhnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov. 2007. 11. 132-135 (in Russ.).

8 Narivskiy A.Eh. Korrozionno-elektrokhimicheskoe povedenie konstrukcionnykh materialov dlya plastinchatykh teploobmennikov v modelnykh oborotnykh vodax: Avtoref.... kand. tekhn. nauk. 2009. 18 (in Russ.).

9 Garfias-Mesias L.F. Sykes J.M. Corrosion science. 1996. 8. 1319-1330 (in Eng.).

10 Chattoraj I., Bhattamishra A.K., Jana S., Das S.K., Chakraborty S.P., De P.K. Corrosion science. 1996. 38. 6. 957-969 (in Eng.).

11 Vorster S.W. Eurocorr 96 present. sess. 1996. 8. 181 (in Eng.).

12 Narajima M., Keiro T., Akatsuka Y. Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. A. 1997. 607. 487-492 (in Eng.).

13 Mishchenko V.G., Snizhnyj G.V., Snizhnyj V.L. Starodubovskie chteniya. 2009.152-156 (in Ukr.).

14 Snezhnoj G.V., Mishchenko V.G., Snezhnoj V.L. Lit'yo i metallurgiya. 2009. 3. 241-244 (in Russ.).

15 Danko P.E., Popov A.G. Vysshaya matematika v uprazhneniyakh i zadachakh. M.: Vysshaya shkola. 1986. 415 (in Russ.).

16 Narivskiy A.Eh. Phiziko-khimicheskaya mekhanika materialov. 2005. 1. 104-108 (in Russ.).

17 Narivskiy A.Eh. Phiziko-khimicheskaya mekhanika materialov. 2007. 1. 110-116 (in Russ.).

18 Kolotyrykin Ya.M. Zashchita metallov.1980. 16. 6. 660-673 (in Russ.).

19 Kolotyrykin Ya.M. Zashchita metallov.-1975. 11. 16. 675-686 (in Russ.).

20 Phrejman L.I., Rephormatskaya I.I. Zashchita metallov. 1991. 27. 4. 617-625 (in Russ.).

Түйіндеме

Бұл мақалада (бөлімде) жылуалмасу қондырғыларында эксплуатация кезінде қолданылатын, суда айналатын модельдеріндегі AISI 321 болатының питтингтұрақтылығына δ -ферриттің әсерін зерттеу мәліметтері қарастырылған. Нейтральды хлорқұрамды қоспаларда AISI 321 болатының питтингтүзілудің (КПТ) критикалық температурасы қосылатын δ -феррит көлемінің артуы кезінде турапропорционалды азаяды. Қышқылы аз судағы айналу моделдерінде 600, 550, 500 мг/дм³ хлор концентрациясында, сондай-ақ 350, 400 мг/дм³ хлорид концентрациялы хлорқұрамды қоспаларда AISI 321 болатының КПТ-сы және ондағы δ -ферриттің көлемі арасындағы тәуелділік анықталған, ол болаттың питтингтұрақтылығына δ -ферриттің әсері біртекті емес екенін дәлелдейді. Айналымалы судан тұндырманың астындағы жылуалмасу аппаратының беткі қабатында түзілетін, жоғарытотықты хлорқұрамды орталардағы активация потенциалы AISI 321 болатының репассивациясы теріс мәнді аумағына қарай қозғалады, ал $\Delta\phi$ - критерий ондағы δ -феррит көлемінің ұлғаюымен артады. δ -феррит жоғарытотыққан хлорқұрамды орталарда AISI 321 болаты катодты қорғайды және, сондай-ақ питтингтұрақтылығын арттырады деген ықтималдылық жасауға болады.

Кілт сөздер: δ -феррит, хлорқұрамды орта, питтингтүзілудің критикалық температурасы, электрохимиялық потенциал

Summary

The article presents results of study of influence of δ -ferrite in steel AISI 321 at its pitting resistance in modeling circulating water used in the operation of heat-exchange equipment. It was shown that in the neutral chloride solutions critical pitting formation temperature (CPT) for AISI 321 steel is reduced in direct proportion to an increase of δ -ferrite volume in the steel. Parabolic dependences between CPT of steel AISI 321 and δ -ferrite volume therein, indicating ambiguous effect of δ -ferrite on steel pitting resistance, were established in weakly acidic modeling circulating waters with chloride concentration of 600, 550, 500 mg/dm³, and in chloride solution with a concentration of chlorides 350, 400 mg/dm³. In highly oxidizing chloride-containing environments, which are formed on the surface of heat exchange equipment under the sediment of recycled water potentials of activation, repassivation of steel AISI 321 are shifted to negative values region, and $\Delta\phi$ - criterion increases with increasing the volume of δ - ferrite in it. It is most likely that δ -ferrite in highly oxidizing chloride-containing environments cathodal protects steel AISI 321 and, thus increases its pitting resistant.

Keywords: δ -ferrite, chloride-containing environment, pit formation critical temperature, electrochemical potential, pitting resistant

Поступила 22.01.2014.