

МЕХАНИЗМ АНОДНОГО РАСТВОРЕНИЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ

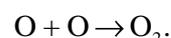
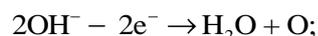
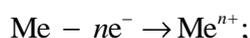
Канд. хим. наук, доц. ИВАНОВА Н. П.¹⁾, канд. техн. наук, доц. СИНЬКЕВИЧ Ю. В.²⁾,
докт. техн. наук, проф. ШЕЛЕГ В. К.²⁾, канд. техн. наук, доц. ЯНКОВСКИЙ И. Н.²⁾

¹⁾Белорусский государственный технологический университет,

²⁾Белорусский национальный технический университет

Установлено, что при электроимпульсном полировании (ЭИП) коррозионностойких и конструкционных углеродистых сталей в водных растворах солей аммония съём металла происходит за счет протекания анодных процессов, приводящих к анодному растворению компонентов сталей [1]. Известно, что процесс анодного растворения металлов и сплавов является гетерогенным, происходящим на границе раздела фаз «металл – электролит» и состоящим из ряда одновременно протекающих последовательных или последовательно-параллельных элементарных стадий [2, 3]. Общая скорость гетерогенного процесса определяется скоростью лимитирующей стадии. Для взаимодействия реагентов в гетерогенной системе необходим перенос вещества из одной фазы в другую. При анодном растворении конкретный характер анодных процессов определяется природой металла (сплава), анионным составом, значением pH раствора электролита и величиной анодного потенциала [3–5].

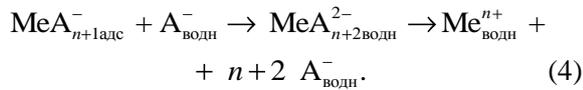
В связи с недостатком и противоречивостью имеющейся в литературе информации о возможных механизмах съема металла в условиях ЭИП значительно затруднены целенаправленный поиск составов электролитов и разработка технологий полирования различных по химическому составу и свойствам металлов и сплавов. Так, в [6] предложены схемы электродных реакций в условиях протекания электролитно-плазменных разрядов в водных растворах электролитов. Согласно схемам, на катоде происходит восстановление катионов водорода H^+ или разложение молекул воды с выделением водорода. На аноде процесс ионизации (окисления) металла и выделение кислорода протекают по схемам:



По мнению авторов, в прианодной области в электролите происходит необратимая реакция между гидроксильными ионами OH^- и катионами металла Me^{n+} с образованием нерастворимых гидроксидов металла (шлама). В случае обработки сталей – это гидроксиды двух- и трехвалентного железа $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$ и хрома $Cr(OH)_3$. Очевидно, что предложенный механизм ионизации металла не учитывает комплекса факторов, влияющих на характер его анодного растворения, и не отражает сути протекающих на аноде процессов.

Согласно современным общепринятым представлениям об анодном растворении металлов по механизму комплексообразования с переходом в раствор простых ионов, ионизация металла начинается с образования комплекса металла с анионами раствора путем адсорбции анионов и (или) молекул воды на поверхности металла [3–5, 7, 8]. В роли анионов могут также выступать и гидроксильные ионы OH^- [3–7]. Поверхностные адсорбционные комплексы образуются как под действием Ван-дер-Ваальсовых сил, так и в результате протекания химических или электрохимических реакций. Образовавшиеся комплексы металла с анионами раствора могут быть промежуточными соединениями, которые в конечном итоге распадаются в растворе электролита на простые ионы или на продукты гидролиза. В галоидных растворах анодное растворение металлов до степени окисления Me^{n+} может происходить по следующей схеме [3]:





На первой стадии (1) происходит обратимая адсорбция аниона раствора электролита $\text{A}_{\text{водн}}^-$ на поверхности металла. Затем на стадиях (2) и (3) по электрохимическому процессу происходит последовательное присоединение к образованному комплексу $\text{MeA}_{\text{адс}}^-$ дополнительных $(n - 1)$ анионов $\text{A}_{\text{водн}}^-$ с потерей $(n - 1)$ электронов до образования адсорбционного комплекса $\text{MeA}_{n+1\text{адс}}^-$ со степенью окисления металла Me^{n+} . На поверхности анода формируется однофазная твердая солевая пленка $\text{Me}|\text{MeA}_{n+1\text{адс}}^-$. На завершающей стадии (4) происходит переход адсорбционного комплекса в раствор электролита с последующим его распадом на простые ионы $\text{Me}_{\text{водн}}^{n+}$ и $\text{A}_{\text{водн}}^-$. Если скорость растворения солевой пленки больше скорости ее образования, то металл растворяется в активной области. В обратном случае наступает солевая пассивация и металл растворяется в пассивном состоянии.

Экспериментальные данные о наличии в поверхностных пленках хлора и серы, приведенные в [1], свидетельствуют о том, что при ЭИП коррозионностойких и конструкционных углеродистых сталей в водных растворах солей аммония анодное растворение компонентов сталей, в частности железа, хрома и никеля, происходит с непосредственным участием анионов растворов электролитов. В [5] экспериментально установлено, что на первых стадиях растворения железа в галоидных и сульфатных растворах на поверхности железа происходит образование как адсорбционных комплексов $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}$ с участием хемосорбированных молекул воды, так и короткоживущих адсорбционных комплексов соответственно $\text{Fe} \text{H}_2\text{O}_{\text{адс}} \text{Cl}_{\text{адс}}^-$ и $\text{Fe} \text{H}_2\text{O}_{\text{адс}} \text{SO}_{4\text{адс}}^{2-}$ с участием хлорид- и сульфат-ионов. По данным [5], поверхностные адсорбционные комплексы «металл – вода» образуются на свежесформированной поверхности в водном растворе электролита в течение 0,4 мс для железа и 0,7 мс для никеля.

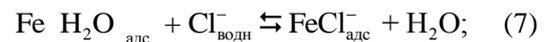
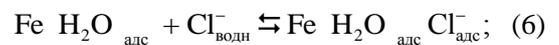
При ЭИП в условиях пробоя парогазовой оболочки (ПГО) электролитными мостиками [9]

продолжительность контакта основных электролитных мостиков с поверхностью анода можно определить из формулы

$$T = \frac{1}{f},$$

где f – частота электрического тока разряда в ПГО, Гц; T – период колебаний, с.

Согласно экспериментальным данным [10], основные электролитные мостики замыкают ПГО с резонансной частотой 400–700 Гц. Продолжительность контакта одного электролитного мостика с поверхностью анода можно принять равной половине периода колебаний электрического тока разряда в ПГО. Тогда численная оценка продолжительности контакта в резонансной области частот дает величину, равную 1,25–0,71 мс. Этому времени достаточно для образования поверхностных адсорбционных комплексов «металл – вода». Следовательно, растворение железа при ЭИП конструкционных углеродистых сталей в водном растворе хлорида аммония может протекать по уточненной схеме и включает следующие стадии:



Растворение железа, согласно предложенной схеме (5)–(10), происходит в результате протекания ряда последовательных и параллельных стадий. Первоначально по реакции (5) на поверхности железа хемосорбируются молекулы воды с образованием гидрокомплекса железа $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}$. Затем на одновременно протекающих параллельных стадиях (6) и (7) происходит взаимодействие адсорбционного комплекса $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}$ с хлорид-ионами $\text{Cl}_{\text{водн}}^-$. Образуются короткоживущие адсорбционные комплексы $\text{Fe} \text{H}_2\text{O}_{\text{адс}} \text{Cl}_{\text{адс}}^-$ и прочные адсорбционные комплексы $\text{FeCl}_{\text{адс}}^-$. Поверхностный

комплекс $Fe(H_2O)_{адс} Cl^-_{адс}$ по сравнению с комплексом $Fe(H_2O)_{адс}$ обладает пониженной стойкостью из-за деформации связей под влиянием отрицательного заряда аниона Cl^- [5]. Далее протекают последовательные электрохимические стадии (8) и (9), аналогичные записанным в общем виде стадиям (2) и (3). На поверхности железа формируется солевая пленка $Fe|FeCl^-_{3адс}$. На завершающей стадии (10) происходят образование и переход в раствор электролита хорошо растворимого адсорбционного комплекса $FeCl^2-_{4водн}$ с последующим его распадом на простые ионы $Fe^{2+}_{водн}$ и $Cl^-_{водн}$.

Для объяснения анодного растворения железа в сульфатных растворах по механизму комплексообразования предложено несколько схем [3–5]. Их основной отличительной особенностью является первая стадия ионизации – стадия адсорбции. Предполагается, что на поверхности железа первоначально адсорбируются либо гидроксильные ионы OH^- , либо сульфат-ионы SO^2-_{4} , либо молекулы воды H_2O . При этом отмечается, что при растворении железа в нейтральных и кислых растворах адсорбция гидроксильных ионов OH^- на поверхности железа затруднена.

В условиях ЭИП обработка коррозионно-стойких и конструкционных углеродистых сталей проводится в кислых растворах соответственно сульфата и хлорида аммония с $pH < 5,5$ (рис. 1). Следует отметить, что при ЭИП при прохождении через раствор электролита некоторого количества электричества pH раствора понижается, т. е. раствор подкисляется. Согласно [11], 4%-й водный раствор сульфата аммония, через который прошло 6 А·ч/л, имел $pH = 2,2–2,4$.

В сверхтонких пленках на поверхности электроимпульсно полированных мартенситных и аустенитных коррозионно-стойких сталей наряду с оксидами железа, хрома, никеля и титана обнаружен кислород в количестве 5,7–11,5 мас. % [12]. Этот факт подтверждает вероятность адсорбции на поверхности анода молекул воды или гидроксильных ионов OH^- . Наличие серы или ее соединений в сверхтонких поверхностных пленках в [12] не установлено. Однако сера обнаружена в поверхностных пленках при определенных условиях проведения процесса ЭИП [1].

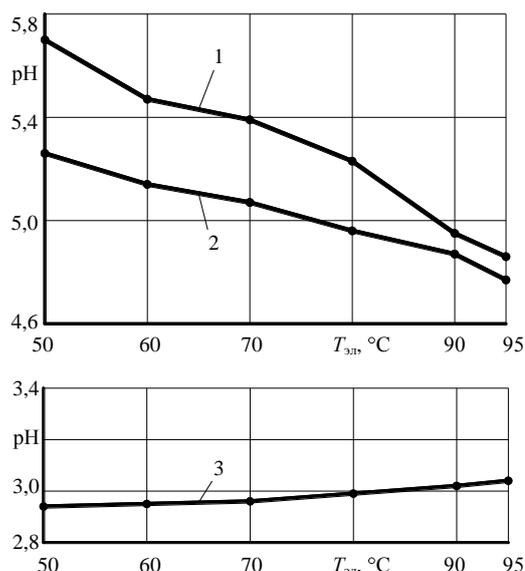
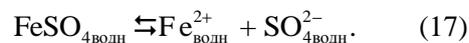
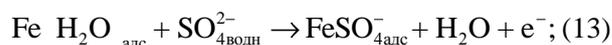
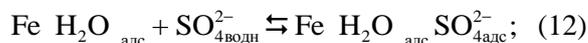
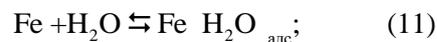


Рис. 1. Зависимость pH от температуры водного раствора: 1 – 2 мас. % хлорида аммония; 2 – 5 мас. % сульфата аммония; 3 – 5 мас. % сульфата аммония и 1,5 мас. % лимонной кислоты

Учитывая экспериментальные данные [1, 12], pH растворов электролитов и [3, 5], можно утверждать, что при анодном растворении железа в условиях ЭИП на поверхности коррозионно-стойких сталей происходит первоначальная адсорбция молекул воды с образованием адсорбционного комплекса $Fe(H_2O)_{адс}$. Затем после адсорбции сульфат-иона $SO^2-_{4водн}$ образуется адсорбционный комплекс $Fe(H_2O)_{адс} SO^2-_{4адс}$. Следовательно, при ЭИП коррозионно-стойких сталей в водном растворе сульфата аммония анодное растворение железа может происходить по уточненной схеме и включает следующие стадии:

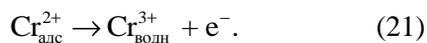
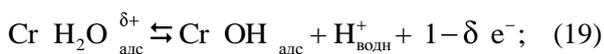


В отличие от схемы, приведенной в [3], в предложенной схеме (11)–(17) на поверхно-

сти железа первоначально по реакции (11) хемосорбируются молекулы воды с образованием гидрокомплекса железа $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}$. Затем на стадии (12) происходит взаимодействие сульфат-иона SO_4^{2-} с хемосорбированной молекулой воды с образованием короткоживущего адсорбционного комплекса $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{SO}_4^{2-}$.

Прочный адсорбционный комплекс FeSO_4^- образуется на одновременно протекающих параллельных стадиях (13) и (14) по электрохимическому процессу с отдачей аноду одного электрона. Далее на стадии (15) происходит гидролиз адсорбционного комплекса FeSO_4^- с образованием адсорбционного комплекса $\text{FeOH}_{\text{адс}}$, который на следующей стадии (16) взаимодействует с сульфат-ионом SO_4^{2-} и отдает аноду один электрон. В результате образуется растворимая соль железа FeSO_4 , которая диссоциирует в растворе электролита по реакции (17) на простые ионы Fe^{2+} и SO_4^{2-} .

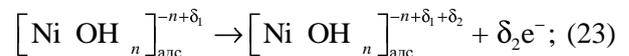
При ЭИП коррозионностойких сталей анодное растворение хрома и никеля по механизму комплексообразования может происходить следующим образом. В условиях первоначальной хемосорбции молекул воды на поверхности металлов могут образовываться адсорбционные комплексы $\text{Me}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}^{\delta+}$, называемые поверхностными комплексами с переносом заряда [5, 7]. В этих комплексах электроны адсорбированных молекул воды $\text{H}_2\text{O}_{\text{адс}}^{\delta+}$ частично обобществлены с электронным газом металла за счет потери молекулой воды части заряда электрона δ ($0 < \delta < 1$). Основываясь на этом положении, растворению хрома при ЭИП в водном растворе сульфата аммония в условиях первичной хемосорбции молекул воды на поверхности хрома может соответствовать следующий механизм [5]:



Согласно схеме (18)–(21), ионизация хрома протекает ступенчато по электрохимическим

процессам. На первой стадии (18) на поверхности хрома образуется адсорбционный гидрокомплекс хрома $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}^{\delta+}$, в котором молекула воды $\text{H}_2\text{O}_{\text{адс}}^{\delta+}$ отдала аноду часть заряда электрона δ . Частичный перенос заряда с молекулы воды на металл ослабляет O–H-связи в адсорбированных молекулах воды и облегчает их диссоциацию на второй стадии (19). На поверхности хрома образуется адсорбционный комплекс $\text{Cr}(\text{OH})_{\text{адс}}$. На третьей стадии (20) в результате взаимодействия поверхностного комплекса $\text{Cr}(\text{OH})_{\text{адс}}$ с катионом водорода $\text{H}_{\text{водн}}^+$ образуется адсорбированный ион хрома промежуточной валентности $\text{Cr}_{\text{адс}}^{2+}$, который на заключительной стадии (21) окисляется и переходит в раствор электролита в виде иона трехвалентного хрома $\text{Cr}_{\text{водн}}^{3+}$.

При ЭИП коррозионностойких сталей в водном растворе сульфата аммония анодные процессы на поверхности никеля в условиях первичной хемосорбции молекул воды могут быть описаны следующей схемой [7]:

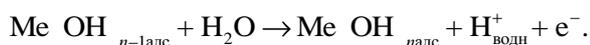


Растворение никеля по схеме (22)–(24) протекает через ряд последовательных стадий. Процесс растворения начинается по реакции (22) с диссоциативной адсорбции воды, которая совмещена с образованием поверхностных гидроксидных адсорбционных комплексов $[\text{Ni}(\text{OH})_n]_{\text{адс}}^{-n+\delta_1}$ и потерей части заряда электрона δ_1 . Затем на электрохимической стадии (23) происходит дальнейшее окисление комплексов $[\text{Ni}(\text{OH})_n]_{\text{адс}}^{-n+\delta_1}$ с потерей части заряда электрона δ_2 . Если на стадиях (22) и (23) поверхностный гидроксидный комплекс теряет только часть заряда $\delta_m < 2$, то стадий (23) будет столько, пока общая потеря заряда не окажется равной двум. В этом случае наступает завершающая стадия (24), на которой происходит разрушение поверхностного адсорбционного комплекса $[\text{Ni}(\text{OH})_n]_{\text{адс}}^{-n+2}$ с переходом

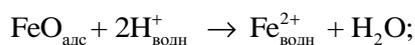
в раствор электролита простых ионов $Ni_{\text{водн}}^{2+}$ и $OH_{\text{водн}}^-$.

Таковы механизмы анодного растворения основных компонентов коррозионностойких и конструкционных углеродистых сталей в условиях ЭИП. Неотъемлемой частью анодного растворения сталей являются вторичные анодные процессы, вносящие дополнительный вклад в растворение компонентов сталей, а также процессы, непосредственно не связанные с ионизацией атомов кристаллической решетки металлов. Рассмотрим основные из них, вероятность протекания которых высока в условиях ЭИП.

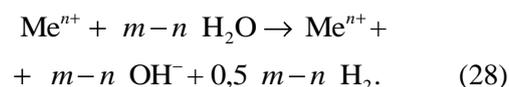
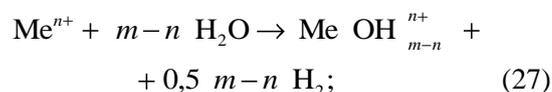
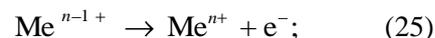
Образование оксидов и гидроксидов металлов на поверхности анода возможно по электрохимическому процессу [3]:



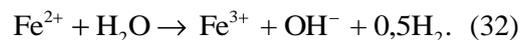
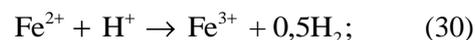
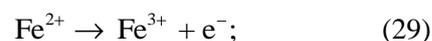
Факт образования оксидов железа, хрома, никеля и титана, а также гидроксидов железа на поверхности электроимпульсно полированных коррозионностойких и конструкционных углеродистых сталей подтверждают экспериментальные данные, приведенные в [1, 12]. Образующиеся на поверхности оксиды и гидроксиды металлов могут растворяться по химическому или электрохимическому процессам, например:



Образующиеся при ЭИП ионы металлов промежуточной валентности окисляются либо непосредственно на поверхности анода, либо в прианодном пространстве за счет их взаимодействия с катионами водорода $H_{\text{водн}}^+$ или молекулами воды:

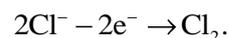
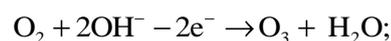
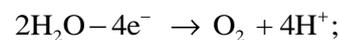


Применительно к анодному растворению железа при ЭИП коррозионностойких и конструкционных углеродистых сталей стадии, описанные в общем виде реакциями (25)–(28), можно представить соответственно в виде:

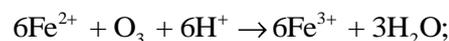


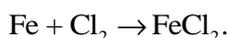
Правомерность стадий (29)–(32) подтверждают экспериментальные данные, приведенные в [12]. В сверхтонких пленках на поверхности электроимпульсно полированных коррозионностойких сталей присутствуют малорастворимые и нерастворимые в воде соединения двух- и трехвалентного железа.

В условиях ЭИП на поверхности анода происходит выделение газообразных веществ, что наряду с их участием в стадиях анодного растворения металлов способствует более легкому образованию ПГО. Так, выделение кислорода, озона и хлора возможно по электрохимическому процессу:

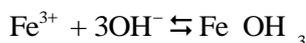


Выделение на аноде кислорода, озона и хлора создает возможность протекания химических реакций, например:





Образование гидроксидов железа, хрома и никеля в условиях ЭИП коррозионностойких и конструкционных углеродистых сталей имеет особенности, связанные с рН растворов электролитов. В табл. 1 приведены значения рН осаждения гидроксидов железа, хрома и никеля. Очевидно, что при ЭИП коррозионностойких и конструкционных углеродистых сталей в водных растворах сульфата и хлорида аммония образование труднорастворимых гидроксидов металлов и их выпадение в осадок в виде шлама возможно только для трехвалентного железа, гидроксид которого образуется непосредственно по реакции:



или благодаря гидролизу:

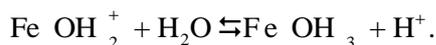
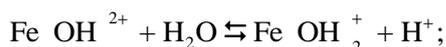


Таблица 1

Значения рН осаждения гидроксидов металлов

| Me(OH) _n | рН гидратообразования по данным | |
|---------------------|---------------------------------|-----------|
| | [2] | [11] |
| Fe(OH) ₂ | 5,5 | 7,50–8,00 |
| Fe(OH) ₃ | 2,0 | 2,10–2,45 |
| Cr(OH) ₃ | 5,3 | 4,55–4,85 |
| Ni(OH) ₂ | 8,0 | 5,90–6,35 |

Образование труднорастворимых гидроксидов хрома и никеля при значениях рН, характерных для ЭИП коррозионностойких сталей в водном растворе сульфата аммония, невозможно. Это приводит к непрерывному накоплению ионов хрома и никеля в растворе и к постепенному снижению полирующей способности электролита.

В условиях ЭИП коррозионностойких и конструкционных углеродистых сталей в водных растворах сульфата и хлорида аммония анионы электролитов играют двойную роль в механизмах анодного растворения железа. При повышении концентраций сульфата аммония от 2,0 до 6,0 мас. % (рис. 2а) и хлорида аммония от 1,0 до 4,0 мас. % (рис. 2б) сульфат- и хлорид-ионы оказывают активирующее действие на процесс растворения железа за счет легкого

образования по реакциям (12) и (6) нестабильных адсорбционных комплексов $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{SO}_4^{2-}$ и $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{Cl}^-$. Дальнейшее повышение концентраций сульфата и хлорида аммония в растворах при низких значениях рН способствует вытеснению сульфат- и хлорид-ионами адсорбированных молекул воды с поверхности анода и активному образованию прочных адсорбционных комплексов FeSO_4^- и FeCl^- , которые блокируют активные центры на анодной поверхности, замедляя процесс растворения железа. В более концентрированных растворах солей аммония заметнее становится ингибирующее действие фазовых оксидных и гидроксидных поверхностных пленок, механически экранирующих отдельные участки анодной поверхности. Иными словами, повышение концентраций сульфата и хлорида аммония в растворах электролитов при ЭИП коррозионностойких и конструкционных углеродистых сталей приводит к пассивации поверхности анода. Этот эффект наиболее выражен у коррозионностойких сталей. Так, повышение концентрации сульфата аммония с 6,0 до 14,0 мас. % при ЭИП стали 20Х13 приводит к снижению величины удельного съема металла на 21,8 %, в то время как повышение концентрации хлорида аммония с 4,0 до 9,0 мас. % при ЭИП стали 20 снижает величину удельного съема на 5,1 % (рис. 2).

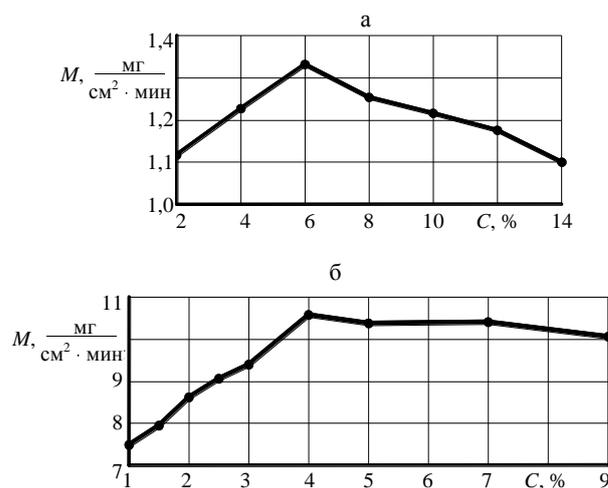


Рис. 2. Зависимость удельного съема металла от концентрации соли аммония: а – сульфат аммония (сталь 20Х13); б – хлорид аммония (сталь 20) ($U = 310 \text{ В}$; $T_{\text{эл}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$)

Влияние лимонной кислоты на анодные процессы при ЭИП коррозионностойких сталей

определяется ее способностью растворять гидроксиды и оксиды двух- и трехвалентного железа, а также оксиды хрома и никеля и переводить металлы в прочные водорастворимые комплексы. Благодаря этому при ЭИП коррозионностойких сталей в двухкомпонентном растворе, содержащем сульфат аммония и лимонную кислоту в исследованных концентрациях, удельный съем металла по сравнению с однокомпонентным раствором больше в 2,5–5,6 раза (рис. 3). При введении лимонной кислоты в раствор хлорида аммония при ЭИП конструкционных углеродистых сталей этот эффект не наблюдается, что, по мнению авторов, связано с активирующим действием хлорид-ионов в процессах растворения железа и его оксидов.

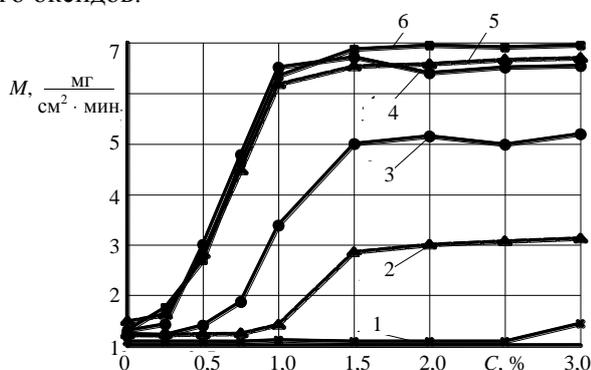


Рис. 3. Зависимость удельного съема металла от концентрации лимонной кислоты в водном растворе сульфата аммония, мас. %: 1 – 2; 2 – 3; 3 – 3,5; 4 – 4; 5 – 6; 6 – 10 (сталь 20X13; $U = 310$ В; $T_{эл} = 70$ °С)

ВЫВОДЫ

1. В условиях ЭИП анодное растворение металлов, входящих в состав коррозионностойких и конструкционных углеродистых сталей, происходит по механизму комплексообразования через ряд последовательных или последовательно-параллельных промежуточных стадий. На первой стадии на поверхности металлов образуются адсорбционные комплексы с участием хемосорбированных молекул воды. В последующих стадиях принимают участие анионы раствора электролита и (или) молекулы воды. На заключительной стадии растворения на поверхности анода образуются растворимые в воде соединения, которые при переходе в раствор диссоциируют на простые ионы.

2. Анодное растворение металлов в условиях ЭИП происходит в области смешанной электрохимической и диффузионной кинетики. Диффузионные ограничения возникают в ре-

зультате затрудненного ионного массопереноса через поверхностные солевые, оксидные и гидроксидные адсорбционно-фазовые пленки.

3. При ЭИП в растворении компонентов коррозионностойких и конструкционных углеродистых сталей значительную роль играют химические процессы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование морфологии и химического состава электроимпульсно полированной поверхности конструкционных углеродистых и коррозионностойких сталей / Н. П. Иванова [и др.] // Наука и техника. – 2012. – № 6. – С. 3–10.
2. Жук, Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н. П. Жук. – М.: Металлургия, 1976. – 472 с.
3. Атанасянц, А. Г. Анодное поведение металлов / А. Г. Атанасянц. – М.: Металлургия, 1989. – 151 с.
4. Флорианович, Г. М. Кинетика растворения железа, хрома, никеля и их сплавов в активном состоянии: дис. ... докт. хим. наук: 02.00.05 / Г. М. Флорианович. – М., 1984. – 470 с.
5. Подобаев, А. Н. Адсорбционное взаимодействие воды с металлами и его роль в процессах электрохимической коррозии: автореф. дис. ... докт. хим. наук: 05.17.03 / А. Н. Подобаев; Науч.-исслед. физ.-хим. ин-т им. Л. Я. Карпова. – М., 2008. – 48 с.
6. Гайсин, А. Ф. Основные физико-химические процессы в плазменно-электролитных разрядах / А. Ф. Гайсин, Р. Н. Кашапов // V Междунар. симп. по теоретич. и прикладной плазмохимии: сб. тр., Иваново, Россия, 3–8 сент. 2008 г.: в 2 т. / Ивановский гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2008. – Т. 1. – С. 99–102.
7. Зотова, Е. Е. Растворение никеля из собственной фазы и фазы интерметаллида NiZn в кислых сульфатных растворах: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.05 / Е. Е. Зотова; Воронежский гос. ун-т. – Воронеж, 2002. – 20 с.
8. Шейн, А. Б. Влияние анионов на анодное растворение силицида никеля в серноуксильном электролите / А. Б. Шейн, О. С. Иванова, Р. Н. Минх // Вестник Удмуртского университета. – 2006. – № 8. – С. 63–74.
9. Синькевич, Ю. В. Исследование механизма прохождения электрического тока через парогазовую оболочку при анодном процессе / Ю. В. Синькевич, И. Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. / Донецкий национ. техн. ун-т. – Донецк, 2011. – Вып. 41. – С. 287–292.
10. Собственные радиоизлучение и ток электрического разряда как инструмент контроля и управления процессом электроимпульсного полирования / Г. Н. Здор [и др.] // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2009. – № 2. – С. 111–119.
11. Провести экспериментально-теоретические исследования влияния емкостно-индуктивных устройств и фильтрующих экранов на стабилизацию процессов ЭПО и ресурс электролитов: отчет о НИР (заключ.) / БГПА; науч. рук. В. Н. Страж. – Минск, 1996. – 24 с. – № ГР 1996850.
12. Синькевич, Ю. В. Формирование качества поверхности при электроимпульсном полировании коррозионностойких сталей / Ю. В. Синькевич // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. / Донецкий гос. техн. ун-т. – Донецк, 2001. – Вып. 17. – С. 231–236.

Поступила 22.10.2012