

Научная статья

УДК 541.64+542.952

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-3-148-157>

Коррозионно-электрохимическое поведение дисилицида железа в сернокислом электролите

Кирилл Владимирович Шадрин, Виктория Вячеславовна Пантелеева, Анатолий Борисович Шеин

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Аннотация. Изучено коррозионно-электрохимическое поведение FeSi_2 -электрода в растворах 5%-ной H_2SO_4 и 5%-ной $\text{H}_2\text{SO}_4 + (0,1-0,5)$ г/л NaF. Сделан вывод, что в растворе 5%-ной H_2SO_4 при потенциале коррозии на поверхности FeSi_2 формируется оксидная пленка, близкая по составу к SiO_2 . Оксидная пленка не восстанавливается при невысоких катодных поляризациях, в результате анодной поляризации отмечается рост пленки и ее легирование оксидами железа. Присутствие на поверхности силицида оксидной пленки обуславливает его высокое химическое сопротивление. Показано, что влияние фторида натрия, вызывающего активацию растворения FeSi_2 -электрода в растворе серной кислоты, связано с ослаблением пассивирующего действия диоксида кремния и оксидов железа; с ростом концентрации NaF роль железа в кинетике электродных процессов на силициде повышается, кремния – снижается. Рассчитан порядок реакции растворения FeSi_2 по NaF в зависимости от потенциала.

Ключевые слова: дисилицид железа; коррозия; оксидная пленка; кислый электролит; фторид натрия.

Для цитирования: Шадрин К.В., Пантелеева В.В., Шеин А.Б. Коррозионно-электрохимическое поведение дисилицида железа // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2022. Т. 12, № 3. С. 148–157. <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-3-148-157>.

Original Article

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-3-148-157>

Corrosion-electrochemical behavior of iron disilicide in sulfuric acid electrolyte

Kirill V. Shadrin, Viktoriya V. Panteleeva, Anatoliy B. Shein

¹Perm State University, Perm, Russia

Abstract. The corrosion-electrochemical behavior of FeSi_2 electrode in 5% H_2SO_4 and 5% $\text{H}_2\text{SO}_4 + (0.1-0.5)$ g/l NaF solutions was studied. It is concluded that in 5% H_2SO_4 solution with a corrosion potential, an oxide film is formed on the FeSi_2 surface, which is similar in composition to SiO_2 . The oxide film is not reduced at low cathodic polarizations; as a result of anodic polarization, the film grows and is doped with iron oxides. The presence of an oxide film on the silicide surface determines its high chemical resistance. It is shown that the effect of sodium fluoride, which activates the dissolution of FeSi_2 electrode in a sulfuric acid solution, is associated with a weakening of the passivating effect of silicon dioxide and iron oxides. With increasing of NaF concentration, the role of iron in the kinetics of electrode processes on silicide increases, while that of silicon decreases. The order of the reaction of FeSi_2 dissolution by NaF was calculated depending on the potential.

Key words: iron disilicide; corrosion; oxide film; acidic electrolyte; sodium fluoride.

For citation: Shadrin, K.V., Panteleeva, V.V. and Shein, A.B.(2022) “Corrosion-electrochemical behavior of iron disilicide in sulfuric acid electrolyte”, *Bulletin of Perm University. Chemistry*, vol. 12, no. 3, pp. 148–157. (In Russ.). <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-3-148-157>.



Отрасли современной металлургической промышленности, специализирующиеся на выплавке стали (одного из самых востребованных материалов) или литье чугуна, в настоящее время трудно представить без использования ферросплавов. Эти материалы являются одними из базовых элементов в указанных технологических процессах [1–3].

Ферросплавы – это сплавы железа с другими элементами (Cr, Si, Mn, Ti и др.), применяемые главным образом для легирования и раскисления стали (феррохром, ферросилиций) [1, 2]. К ферросплавам условно относят также некоторые сплавы, содержащие железо лишь в виде примесей (силикокальций, силикомарганец), и некоторые металлы и неметаллы (Mn, Cr, Si) с минимальным содержанием примесей.

Помимо металлургии ферросплавы выступают источниками химических элементов в процессах нанесения защитных металлических покрытий [1, 2]. Также они применяются для получения особо чистых (химически) веществ, в качестве восстановителей в металлотермических процессах, при обогащении полезных ископаемых. Благодаря существованию ферросплавов возможен процесс производства материалов с улучшенными и специальными свойствами – конструкционных, коррозионно-стойких, жаропрочных, жаростойких, прецизионных и электротехнических сталей, специальных литейных чугунов [1–3].

Большую группу ферросплавов составляют кремнистые ферросплавы; эту группу главным образом образует ферросилиций, основными компонентами которого являются железо и кремний [2]. Содержание кремния в ферросилиции зависит от марки сплава, варьируется в пределах от 19 до 95 % и регламентируются

нормами ГОСТ 1415-93. Широкое применение ферросилиция в качестве легирующей добавки для придания металлам и сплавам повышенной коррозионной стойкости обуславливает интерес к исследованию его коррозионно-электрохимических характеристик в различных агрессивных средах [4–6].

Целью настоящей работы является установление основных кинетических закономерностей коррозионно-электрохимического поведения дисилицида железа (FeSi_2) в сернокислом электролите, определение влияния фторида натрия на кинетику электродных процессов на силициде.

Объекты и методы исследования

Материалом для исследования служил монокристаллический дисилицид железа (FeSi_2), полученный методом Бриджмена.

Для проведения электрохимических измерений образцы помещали в специально изготовленные фторопластовые держатели и заливали полимеризованной эпоксидной смолой, оставляя незащищенной только рабочую поверхность электрода, которая составляла $0,3 \text{ см}^2$. Все приведенные в работе удельные величины отнесены к единице геометрической площади поверхности электрода.

Электрохимические измерения проведены при температуре $20\text{--}22^\circ\text{C}$ в условиях естественной аэрации в перемешиваемых растворах 5%-ной H_2SO_4 и 5%-ной $\text{H}_2\text{SO}_4 + (0,1\text{--}0,5) \text{ г/л NaF}$, приготовленных на основе дистиллированной воды и реактивов H_2SO_4 квалификации «хч», NaF квалификации «чда». Измерения проведены с помощью потенциостата-гальваностата с встроенным частотным анализатором Solartron 1280C фирмы Solartron Analytical (Великобритания) в электрохимической ячейке

ЯСЭ-2 с разделенными пористой стеклянной диафрагмой катодным и анодным отделениями. В связи с возможным взаимодействием фтороводородной кислоты, которая образуется при введении NaF в раствор серной кислоты, со стеклом измерения во фторидсодержащем электролите осуществляли во фторопластовой ячейке. В качестве электрода сравнения использовали насыщенный хлоридсеребряный электрод, в качестве вспомогательного электрода – платиновый электрод. Все потенциалы в работе приведены относительно стандартного водородного электрода.

Перед проведением измерений рабочую поверхность электрода шлифовали абразивными бумагами с последовательным уменьшением размера зерна (марки P400 и P1000), обезжиривали этиловым спиртом, ополаскивали рабочим раствором. После погружения в раствор электрод подвергали катодной поляризации при плотности тока $0,5 \text{ мА/см}^2$ в течение 10 мин, затем выдерживали при потенциале разомкнутой цепи до установления стационарного значения, далее регистрировали вольтамперные кривые, цикловольтамперограммы и спектры импеданса. Вольтамперные кривые измеряли в потенциодинамическом режиме ходом из катодной области в анодную область со скоростью развертки потенциала $1,0 \text{ мВ/с}$. Цикловольтамперограммы регистрировали со скоростью развертки потенциала 10 мВ/с . Диапазон используемых в импедансных измерениях частот f ($\omega/2\pi$) составлял от 20 кГц до $0,008 \text{ Гц}$, амплитуда переменного сигнала – 10 мВ .

При электрохимических измерениях и обработке полученных данных использовали программы CorrWare2, ZPlot2, CView2, ZView2 (Scribner Associates, Inc.).

Морфологию рабочей поверхности электрода, подвергнутого коррозионным испытаниям, исследовали с помощью металлографического микроскопа «Olimpus BX51» с системой визуализации.

Результаты и их обсуждение

Квазистационарная поляризационная кривая FeSi₂-электрода (рис. 1) в растворе 5%-ной H₂SO₄ характеризуется относительно невысокими значениями плотности тока анодного растворения, низкой скоростью коррозионного процесса (плотность тока коррозии $i_{кор}$ составляет $0,176 \pm 0,044 \text{ мкА/см}^2$) и высоким перенапряжением выделения водорода.

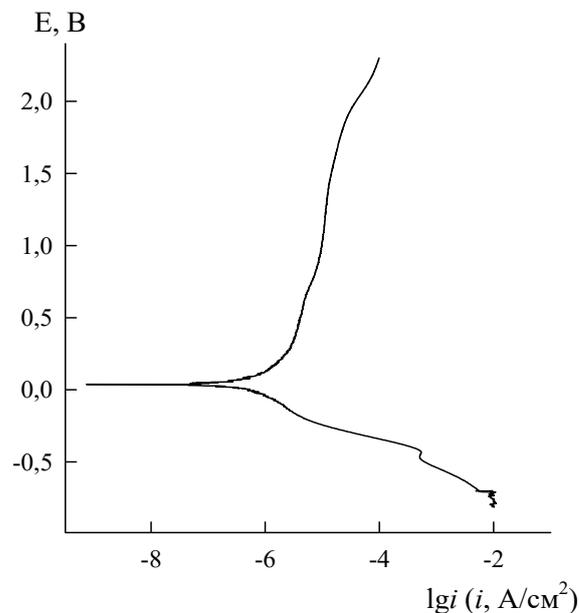


Рис. 1. Поляризационная кривая FeSi₂-электрода в 5%-ной H₂SO₄

На циклической вольтамперной кривой (ЦВА) FeSi₂-электрода в растворе 5%-ной H₂SO₄ при сканировании потенциала от $E_{кор}$ до потенциала реверса $E_{реверс} = 2,3 \text{ В}$ (скорость развертки потенциала $\nu = 10 \text{ мВ/с}$) в первом цикле поляризации регистрируются более высокие значения плотности тока растворения сплава по сравнению со вторым и следующими

циклами, на реверсивной ветви кривой катодные пики не регистрируются (рис. 2); переход i, E -кривой в область катодных потенциалов при

$E \approx 0,8$ В связан с облагораживанием потенциала коррозии ферросплава в результате анодной поляризации.

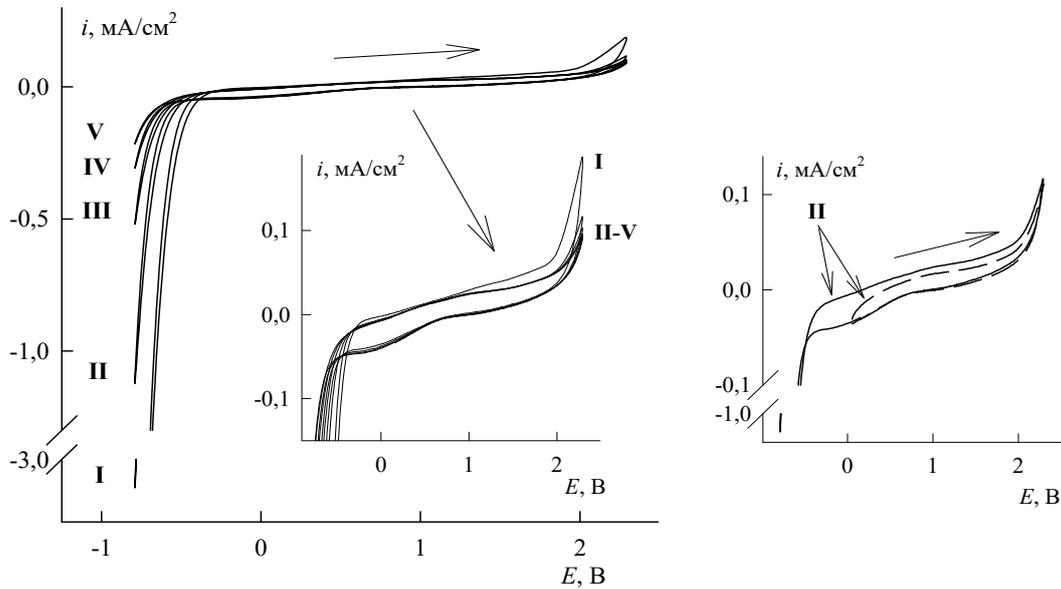


Рис. 2. Многоцикловая вольтамперограмма FeSi_2 -электрода в 5% H_2SO_4 при $\nu = 10$ мВ/с.

I–V – номер цикла поляризации

Сравнение второго цикла поляризации на ЦВА-кривых без перевода электрода в катодную область и с переводом – до достижения потенциала $E = -0,8$ В, показывает, что катодная поляризация электрода вызывает разблагораживание потенциала коррозии и увеличение значений i в анодной области (рис. 2, вставка). Однако различие в величинах $E_{кор}$ и i для силицида, подвергнутого и не подвергнутого катодной активации, невелико, что указывает на высокие защитные свойства оксидной пленки, образующейся на поверхности электрода во время анодной поляризации и не восстанавливающейся при невысоких катодных поляризациях.

Высокая коррозионная и анодная стойкость FeSi_2 -электрода в кислых средах, по-видимому, обусловлена формированием на его поверхности пассивирующей пленки, состоящей преимущественно из диоксида кремния с небольшим содержанием оксидов железа, стехиомет-

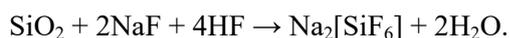
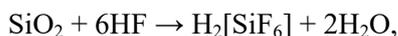
рия которых зависит от величины электродной поляризации [7–11]. Оксидная пленка на ферросплаве образуется уже при потенциале коррозии по реакции [12]:



Равновесный потенциал данной реакции согласно термодинамическим расчетам Латимера составляет $E^0 = -0,86$ В. Однако в растворе устанавливается так называемый стационарный потенциал, величина которого из-за присутствия на поверхности кремния оксидной пленки смещена в положительную сторону относительно равновесного значения и близка к величине $-0,1$ В [13]. По своим электрическим свойствам оксидная пленка на Si-электроде подобна оксидным слоям на вентильных металлах, что обуславливает низкие значения тока растворения кремния [14]. Авторами [15–17], исследовавшими термодинамические и кинетические закономерности анодных процессов на

силицидах переходных металлов в кислых средах, также показано, что пассивные пленки на силицидах состоят преимущественно из SiO_2 с небольшим содержанием оксидов металлов.

Скорость растворения FeSi_2 значительно возрастает в присутствии фторида натрия (рис. 3), выступающего в роли активатора процесса химического растворения диоксида кремния. Согласно [18] в присутствии фтороводородной кислоты или ее солей пассивационное влияние диоксида кремния ослабляется: при взаимодействии SiO_2 с HF или F^- -ионами образуются кремнефтористоводородная кислота или фторосиликаты:



Анодная ветвь поляризационных кривых FeSi_2 -электрода в растворе 5%-ной H_2SO_4 , содержащем переменное количество NaF , характеризуется наличием двух слабовыраженных пиков (рис. 3). Потенциал коррозии $E_{\text{кор}}$ и потенциалы, которыми характеризуются первый и второй анодные пики, с увеличением концентрации NaF смещаются в катодную область. Критическая плотность тока анодных пиков и величина плотности тока в катодной области заметно возрастают с увеличением содержания в растворе NaF . Порядок реакции растворения $n_{\text{NaF}} = (\partial \lg i / \partial \lg C_{\text{NaF}})_E$ для FeSi_2 -электрода заметно зависит от величины электродной поляризации (рис. 3, вставка), что указывает на сложный характер межфазных процессов на поверхности силицида во фторидсодержащем электролите и, по-видимому, на повышение роли металлического компонента сплава в кинетике электродных процессов.

Содержащиеся в растворе фторид-ионы могут по-разному препятствовать пассивации

FeSi_2 , они могут нарушать пассивное состояние сплава или препятствовать его возникновению. То есть механизм их активирующего действия будет заключаться либо в том, что они будут разрушать уже сформировавшуюся фазовую пленку оксида, либо, адсорбируясь на поверхности электрода, будут препятствовать формированию оксидной пленки.

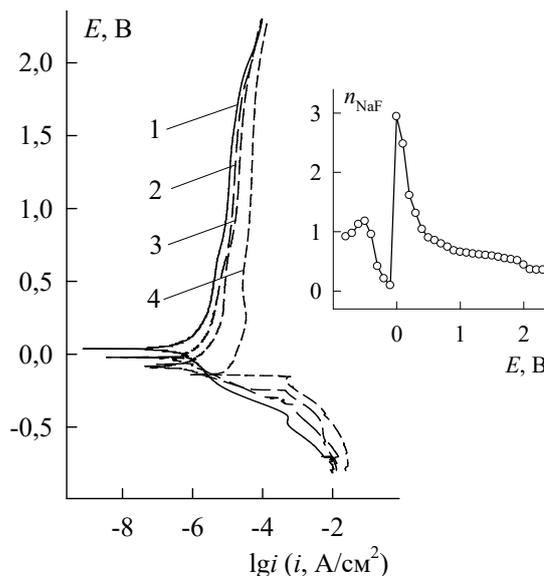


Рис. 3. Поляризационные кривые FeSi_2 -электрода в растворах: 1 – 5%-ная H_2SO_4 ; 2 – 5%-ная H_2SO_4 + 0,1 г/л NaF ; 3 – 5%-ная H_2SO_4 + 0,3 г/л NaF ; 4 – 5%-ная H_2SO_4 + 0,5 г/л NaF .

На вставке – зависимость порядка реакции растворения FeSi_2 от потенциала

На рис. 4 приведены результаты исследования влияния фторида натрия на анодное поведение FeSi_2 -электрода, подвергнутого предварительному анодному окислению в 5%-ной H_2SO_4 . Видно, что введение в раствор фторид-ионов вызывает растворение SiO_2 в тем большей степени, чем выше добавка NaF . Следовательно, механизм активирующего действия фторидов заключается, главным образом, в разрушении поверхностной оксидной пленки. Несмотря на то, что реакция растворения SiO_2 в присутствии HF является химической, ее про-

текание приводит к росту анодного тока, так как для восстановления стационарной соответствующей данному значению E толщины пассивирующего слоя протекает электрохимический процесс окисления кремния.

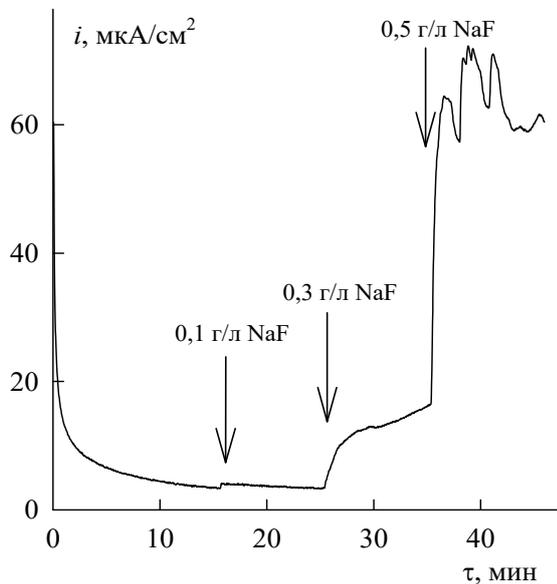


Рис. 4. Влияние концентрации NaF на величину тока растворения FeSi₂-электрода в 5%-ной H₂SO₄ при $E = 1,0$ В

Из хроно-импедансных диаграмм FeSi₂-электрода в растворе 5% H₂SO₄ при $E_{кор}$ следует (рис. 5), что система характеризуется высоким модулем импеданса ($|Z| > 20$ кОм·см²) уже на начальных этапах экспозиции сплава в растворе; с увеличением времени экспозиции величина импеданса возрастает.

Последнее свидетельствует о повышении коррозионной стойкости силицида, что, по-видимому, обусловлено увеличением толщины поверхностной оксидной пленки на силициде, повышением ее барьерных свойств. Во фторидсодержащем электролите величина импеданса заметно меньше по сравнению с безфторидным раствором; модуль импеданса системы с ростом времени экспозиции снижается.

В соответствии с данными микроскопических исследований экспозиция FeSi₂ в растворе 5% H₂SO₄ при потенциале коррозии $E_{кор}$ в течение 24 ч оказывает слабое влияние на морфологию поверхности, что свидетельствует о высокой коррозионной стойкости силицида (на рис. 6 для сравнения представлены микрофотографии поверхности электрода до и после анодного травления в сернокислом безфторидном и фторидсодержащем растворах).

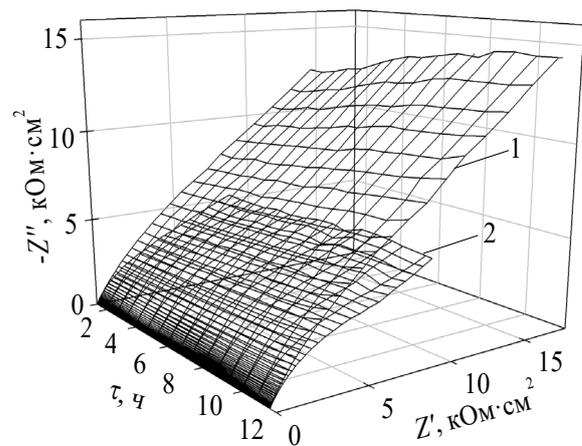


Рис. 5. Хроно-импедансные диаграммы FeSi₂-электрода в растворах: 1 – 5% H₂SO₄; 2 – 5% H₂SO₄ + 0,5 г/л NaF

Введение в раствор NaF приводит к растравливанию поверхности ферросплава. Развитие поверхности электрода во фторидсодержащем электролите обусловлено растворением вызывающего пассивацию FeSi₂ оксида SiO₂ при взаимодействии с фтороводородной кислотой.

Заключение

Коррозионно-электрохимическое поведение дисилицида железа FeSi₂ в растворе 5%-ной H₂SO₄ определяется поверхностной химически стойкой в кислых средах оксидной пленкой, основу которой составляет SiO₂ (с небольшим содержанием оксидов железа при анодных потенциалах).

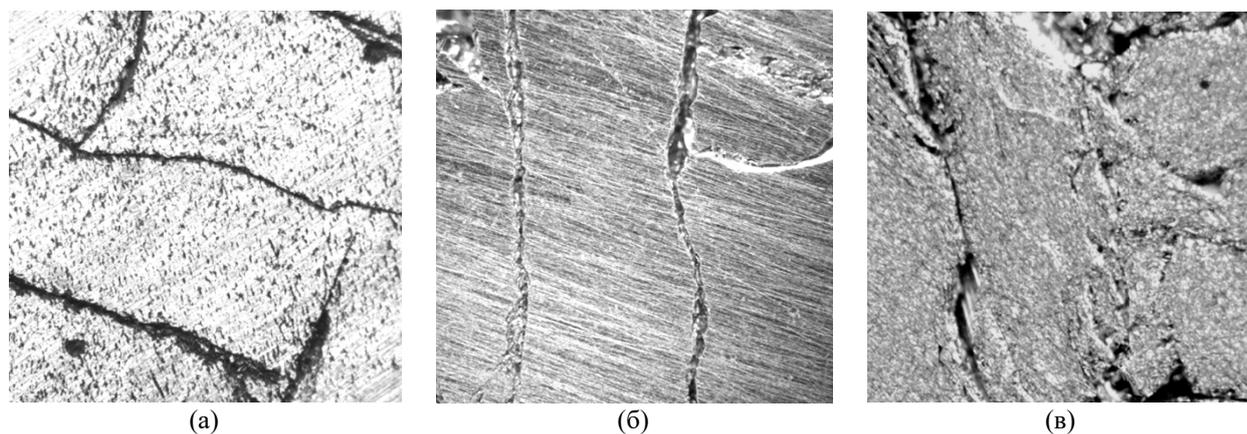


Рис. 6. Микрофотографии поверхности FeSi₂-электрода (×100) до (а) и после экспозиции в 5 %-ной H₂SO₄ (б) и в 5 %-ной H₂SO₄ + 0,5 г/л NaF (в) при $E_{кор}$ в течение 24 ч

Присутствие на поверхности силицида оксидной пленки обуславливает его высокое химическое сопротивление. Коррозия дисилицида железа протекает с водородной деполяризацией; выделение водорода характеризуется высоким перенапряжением. Влияние фторида натрия, вызывающего активацию растворения

FeSi₂ в растворе серной кислоты, связано с ослаблением пассивирующего действия диоксида кремния и оксидов железа. С ростом концентрации фторида натрия роль кремния (диоксида кремния) в кинетике электродных процессов на силициде снижается, роль железа и продуктов его окисления – возрастает.

Список источников

1. Гасик М.И., Лякишев М.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. М.: Металлургия, 1988. 784 с.
2. Гасик М. И., Зубов В. Л. Электротехнология ферросилиция. Днепропетровск: Системные технологии, 2002. 704 с.
3. Мысик В.Ф., Жданов А.В., Павлов В.А. Металлургия ферросплавов: технологические расчеты. Екатеринбург: изд-во Урал. ун-та, 2018. 536 с.
4. Княжева В.М., Бабич С.Г., Колотыркин В.И., и др. Металлоподобные соединения переходных металлов – новый класс коррозионно-стойких материалов и защитных покрытий // Защита металлов. 1991. Т. 27, № 4. С. 603–616.
5. Xu J., Zhou C., Chen Z., Wang Y., et al. Corrosion behaviors of (Cr,Fe)₃Si/Cr₁₃Fe₅Si₂ composite coating under condition of synergistic effects of electrochemical corrosion and mechanical erosion // Journal of Alloys and Compounds. 2010. Vol. 496. P. 429–432.
6. Шеин А.Б. Электрохимия силицидов и германидов переходных металлов. Пермь: ПГНИУ, 2009. 269 с.
7. Vetter K.J. Dicke und Aufbau von passivierenden Oxydschichten auf Eisen // Zeitschrift für Elektrochemie, Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie. 1958. Vol. 62, № 6–7. P. 642–648. <https://doi.org/10.1002/bbpc.19580620606>.

8. *Hickling A., Ives D.J.G.* The electrochemical behaviour of iron oxides in dilute sulphuric acid and the interpretation of the Flade-potential of iron // *Electrochimica Acta*. 1975. Vol. 20, № 1. P. 63–69. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(75\)85046-8](https://doi.org/10.1016/0013-4686(75)85046-8).
9. *Nishimura R., Kudo K., Sato N.* Intensity-following ellipsometry of passive films on iron // *Surface Science*. 1980. Vol. 96, № 1–3. P. 413–425. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(80\)90317-9](https://doi.org/10.1016/0039-6028(80)90317-9).
10. *Хентов А.И., Сухотин А.М., Акимов А.Г., и др.* Спектроскопическое исследование анодного поведения окислов железа в кислых растворах // *Электрохимия*. 1982. Т. 18, № 3. С. 411–414.
11. *Сухотин А.М.* Физическая химия пассивирующих пленок на железе. Л.: Химия, 1989. 162 с.
12. *Справочник по электрохимии* / под ред. А.М.Сухотина. Л.: Химия, 1981. 488 с.
13. *Латимер В.М.* Окислительные состояния элементов и их потенциалы в водных растворах. М.: Издательство иностранной литературы, 1954. 400с.
14. *Zhang X.G.* Electrochemistry of silicon and its oxide. New York: Kluwer Academic/Plenum Publ., 2001. 510 p.
15. *Тюрин А.Г.* Термодинамическая оценка влияния кремния на химическую и электрохимическую устойчивость железохромистых сплавов // *Защита металлов*. 2004. Т. 40, № 1. С. 19–27.
16. *Пантелеева В.В., Шеин А.Б., Кичигин В.И.* Импеданс анодных процессов на силицидах металлов триады железа в кислых и щелочных средах // *Коррозия: материалы, защита*. 2017. № 6. С. 1–10.
17. *Пантелеева В.В., Шеин А.Б.* Анодные процессы на пассивных NiSi-, FeSi- и CoSi-электродах в серноокислом фторидсодержащем электролите // *Коррозия: материалы, защита*. 2018. № 7. С. 1–10.
18. *Батенков В.А.* Электрохимия полупроводников. Барнаул: изд-во Алт. ун-та, 2002. 162 с.

Информация об авторах

Кирилл Владимирович Шадрин, магистрант, кафедра физической химии, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15), <https://orcid.org/0000-0002-5862-1139>, gusselmayer@mail.ru.

Виктория Вячеславовна Пантелеева, кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15), <https://orcid.org/0000-0002-1506-6665>, vikrant@mail.ru.

Анатолий Борисович Шеин, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры физической химии, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15), <https://orcid.org/0000-0002-2102-0436>, ashein@psu.ru.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 3 сентября 2022 г; одобрена 15 сентября 2022 г; принята к публикации 16 сентября 2022 г.

References

1. Gasik, M.I., Lyakishev, M.P. and Emlin, B.I. (1988), *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva ferrosplavov* [Theory and technology of production of ferrous alloys], Metallurgiya, Moscow. (In Russ.).
2. Gasik, M. I. and Zubov, V. L. (2002) *Elektrometallurgiya ferrosilitsiya* [Electrometallurgy ferrosilicon], Sistemnye tekhnologii, Dnepropetrovsk. (In Russ.).
3. Mysik, V.F., Zhdanov, A.V. and Pavlov, V.A. (2018) *Metallurgiya ferrosplavov: tekhnologicheskie rascheti* [Metallurgy of ferrous alloys: technological calculations], Ural University Press, Ekaterinburg. (In Russ.).
4. Knyazheva, V.M., Babich, S.G., Kolotyркиn, V.I. and Kozhevnikov, V.B. (1991), “Metallides of the transitional metals – a new class of corrosion resistant materials and the protective coating”, *Zashhita metallov*, vol. 27, no. 4, pp. 603–616. (In Russ.).
5. Xu, J., Zhou, C., Chen, Z., Wang, Y. and Jiang, S. (2010), “Corrosion behaviors of $(\text{Cr,Fe})_3\text{Si}/\text{Cr}_{13}\text{Fe}_5\text{Si}_2$ composite coating under condition of synergistic effects of electrochemical corrosion and mechanical erosion”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 496, pp. 429–432.
6. Shein, A.B. (2009), *Elektrokhimiya silitsidov I germanidov perekhodnykh metallov* [Electrochemistry of transition metal silicides and germanides], Perm State University Perm, Russia. (In Russ.).
7. Vetter, K.J. (1958) “Dicke und Aufbau von passivierenden Oxydschichten auf Eisen“, *Zeitschrift für Elektrochemie, Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, vol. 62, no. 6–7, pp. 642–648. (In German).
8. Hickling, A. and Ives, D.J.G. (1975) “The electrochemical behaviour of iron oxides in dilute sulphuric acid and the interpretation of the Flade-potential of iron”, *Electrochimica Acta*, vol. 20, no. 1, pp. 63–69.
9. Nishimura, R., Kudo, K. and Sato, N. (1980) “Intensity-following ellipsometry of passive films on iron”, *Surface Science*, vol. 96, no. 1–3, pp. 413–425.
10. Khentov, A.I., Sukhotin, A.M., Akimov, A.G. and Astafiev, M.G. (1982) “Spectroscopic study of the anodic behavior of iron oxides in acidic solutions”, *Elektrokhimiya*, vol. 18, no. 3, pp. 411–414. (In Russ.)
11. Sukhotin, A.M. (1989) *Fizicheskaya khimiya passiviruyushchikh plenok na zheleze* [Physical chemistry of passivating films on iron], Khimiya, Leningrad. (In Russ.).
12. Sukhotin, A.M. (ed.) (1981) *Spravochnik po elektrokhimii* [Electrochemistry Handbook], Khimiya, Leningrad. (in Russ.).
13. Latimer, V.M. (1954) *Okislitel'nye sostoyaniya elementov I ikh potentsialy v vodnykh rastvorakh* [Oxidation states of elements and their potentials in aqueous solutions], Publishing House of Foreign Literature, Moscow. (In Russ.).
14. Zhang, X.G. (2001) *Electrochemistry of silicon and its oxide*, Kluwer Academic/Plenum Publ., New York.
15. Tyurin, A.G. (2004) “Thermodynamic analysis of the silicon effect on chemical and electrochemical stability of iron-cromium alloys”, *Protection of Metals*, vol. 40, no. 1, pp. 14–22. (In Russ.).

16. Panteleeva, V.V., Shein, A.B. and Kichigin, V.I. (2017), “Impedance of anode processes on metal silicides of the iron triad in acidic and alkaline solutions”, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, vol. 6, pp. 1–10. (in Russ.).
17. Panteleeva, V.V., Shein, A.B. (2018), “Anode Processes on passive NiSi-, FeSi-, and CoSi-electrodes in sulfuric acid fluoride-containing electrolyte”, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, vol. 7, pp. 1–10.(In Russ.).
18. Batenkov, V.A. (2002), *Elektrokhimiya poluprovodnikov*. [Electrochemistry of semiconductors], Altay State University, Barnaul. (In Russ.).

Information about the authors

Kirill V. Shadrin, Master student, Department of Physical Chemistry, Perm State University (15, Bukirev str., Perm, 614990, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-5862-1139>, gusselmayer@mail.ru.

Viktoriya V. Panteleeva, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Physical Chemistry, Perm State University (15, Bukirev str., Perm, 614990, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-1506-6665>, vikpant@mail.ru

Anatoly B. Shein, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor, Department of Physical Chemistry, Perm State University (15, Bukirev str., Perm, 614990, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-2102-0436>, ashein@psu.ru

Conflicts of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Submitted 3 September 2022; approved after reviewing 15 September 2022; accepted 16 September 2022.