

ISSN 0132-0890
www.rudmet.ru

Черные металлы

Издается с 1961 года
(№ 1084)

4.2022

С Днем космонавтики!



ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 4 (1084), апрель 2022 г.

Издается с 1961 г.

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения

Учредители:

Акционерное общество
«Издательский дом
«Руда и Металлы»

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Федеральное бюджетное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г. И. Носова»

При участии:

ПАО «ММК»
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»
Государственного Эрмитажа

Официальный информационный орган
Федерального УМО
«Технологии материалов»

Редакционный совет:

Главный редактор: В. М. Колокольников
Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев
Зам. главного редактора: А. Г. Воробьев, Е. В. Цирульников
А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина,
Р. М. Валеев, Е. П. Волынкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада),
Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков, А. П. Коликов,
А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарев, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Ю. Ю. Пиотровский, А. Н. Савенок (Беларусь),
А. В. Серебряков, И. А. Султангузин, С. С. Ткаченко, А. Я. Травянов, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин,
П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников
Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова
Редактор: Э. Э. Бабали

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 622

Адрес редакции:
• фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 617
• почтовый: 119049, Москва, а/я № 71
Телефон/факс: (495) 955-01-75
Эл. почта: chernet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 4 (1084), апрель 2022 г.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство ПИ № ФС77-48681 от 28.02.2012 г.)

Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»
Отпечатано с предоставленных готовых файлов
в типографии «Кандлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16. стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 06.05.2022. Формат 60х90/8.
Печ. л. 9,5. Offsetная печать. Бумага offsetная.
Тираж 800 экз. Цена свободная

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель
За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор
Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции
При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна
«Реклама» — материал публикуется на правах рекламы
Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции
и редсовета журнала

Подписные индексы:
12985 («Пресса России»)

ISSN 0132-0890



© Оформление. АО «Издательский дом «Руда и Металлы», «Черные металлы», 2022

© Фото для обложки предоставлено пресс-службой РКК «Энергия» им. С. П. Королева

На фото: Ракета с кораблем-модулем «Прогресс М-УМ» с узловым модулем «Причал» перед стартом на космодроме Байконур, ноябрь 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Производство чугуна

- К. В. Голощапов, О. А. Кобелев, А. Е. Титлянов, Р. Ю. Казбеков.* Разработка теплоизолирующей вставки в дутьевой канал воздушной фурмы доменной печи с применением математического моделирования 4

Производство стали

- Р. А. Гизатулин, А. И. Мусатова, Н. В. Мартюшев, Д. В. Валуев, А. И. Карлина.* Разработка и применение нормативных тактовых моделей для модернизации электросталеплавильного цеха. . . 10

Литейное производство

- И. О. Леушин, А. Н. Грачев, Л. И. Леушина, П. М. Явтушенко.* Жидкоподвижная самотвердеющая смесь улучшенной технологичности для изготовления форм и стержней стального литья. 17
- Т. Р. Гильманшина, А. А. Ковалева, С. А. Худоногов, Д. Ю. Крицкий.* Использование графисодержащего шлама в составе противопопригарных покрытий 23

Прокатка и термообработка

- Д. Л. Шварц, А. М. Михайленко, Е. И. Салихьянова.* Оптимизация калибровок валков для прокатки швеллеров. Сообщение 2. Пространство швеллерных калибров 27
- О. Б. Крючков, А. В. Крохалев, П. И. Маленко, Э. В. Седов.* Экспериментально-расчетное исследование эквивалентного коэффициента теплопроводности при нагреве рулона ленты. . . . 34

Химические технологии

- И. В. Скворцова, Е. А. Елисеева, С. Л. Березина, В. С. Болдырев.* Особенности анодного поведения хрома в кислотном электролите 41

Нанесение покрытий и обработка поверхности

- Ю. Н. Гойхенберг, Д. С. Полухин.* Структура, свойства и качество композитного никель-фосфорного покрытия, наносимого на стальные подложки различного состава 46

Энергетика и экология

- И. А. Султангузин, П. А. Шомов, А. В. Егоров, И. В. Евсеев, Ю. В. Яворовский.* Топливо-энергетический баланс электрометаллургического мини-комплекса 50
- В. С. Дубинин, Т. А. Степанова, С. О. Шкарупа, В. П. Крупский.* Новые способы производства электроэнергии с использованием пара систем испарительного охлаждения высокотемпературных установок черной металлургии 57

Машиностроительные технологии

- В. Д. Кухарь, В. А. Коротков, С. С. Яковлев, А. А. Шишкина.* Анализ напряженно-деформированного состояния при получении рифлей в стальной цилиндрической заготовке . . . 62
- Е. А. Даниленко, А. С. Ямников, А. А. Маликов.* Влияние упругих деформаций нежесткой коробчатой заготовки, лимитированных конструкцией приспособления, на точность обработанных поверхностей. 66
- В. В. Истоцкий.* Конструктивные особенности концевых фрез с комбинацией режущих и деформирующих зубьев для обработки вязко-пластичных сплавов 71

Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по металлургии

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Chemical Abstracts Service

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Scopus, II квартал (2020)

(по версии SCIMAGO)

Особенности анодного поведения хрома в кислотном электролите

И. В. Скворцова, доцент кафедры химии и методики преподавания химии¹, канд. хим. наук, эл. почта: i_dorovskih@mail.ru

Е. А. Елисеева, доцент кафедры химии², канд. хим. наук, эл. почта: yakusheva@bmstu.ru

С. Л. Березина, доцент кафедры химии², канд. техн. наук, эл. почта: sberezina@bmstu.ru

В. С. Болдырев, доцент кафедры химии, заведующий отделом «Инжиниринг химико-технологических систем» инжинирингового центра «Автоматика и робототехника»², магистрант³, канд. техн. наук, эл. почта: boldyrev.v.s@bmstu.ru

¹ФГБОУ ВО «Омский государственный педагогический университет», Омск, Россия.

²ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана», Москва, Россия.

³ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева», Москва, Россия.

Изучение кинетических особенностей растворения хрома актуально в связи с его широким применением в сталях и сплавах, прочностных и коррозионностойких покрытиях, в электронной технике и многих других отраслях. В связи с обеднением и снижением запасов хромосодержащих руд создание новых высокоэффективных технологий их переработки приобретает первостепенное значение. Наряду с актуальными вопросами оптимизации технологий химического травления, выщелачивания и обогащения хромосодержащих руд, перспективными являются разработка комбинированных химико-электрохимических методов, развитие теории и практики электрохимических методов переработки минерального сырья. В работе приведены результаты изучения особенностей анодного поведения хрома в кислотной среде. В качестве рабочего использовали водный раствор серной кислоты. Потенциодинамическим методом установлена зависимость кинетики анодного растворения хрома от кислотности электролита. На основании анализа экспериментальных и термодинамических данных сделан вывод о стадийном протекании процесса с образованием гидроксокомплексов хрома и механизме его анодного растворения. Полученные данные расширяют представления об электрохимическом поведении хрома и могут быть учтены при разработке режимов выщелачивания хромосодержащих руд и процессов, связанных с растворением хрома в кислотных средах.

Ключевые слова: оксиды хрома, электродный потенциал, поляризационные кривые, анодное растворение, гидроксокомплексы, плотность анодного тока.

DOI: 10.17580/chm.2022.04.07

Введение

Широкий спектр применения хрома основан на его жаропрочности, твердости и устойчивости к коррозии. Три четверти получаемого хрома используют в металлургии, он входит в состав легированных, нержавеющих, особо износостойких, бронированных, оружейных и огнеупорных сталей [1]. Стали с высоким содержанием хрома применяют для изготовления подводных частей кораблей и корпусов подводных лодок, стволов огнестрельных орудий, металлорежущих инструментов, химического и медицинского оборудования, при производстве сопел мощных плазматронов и в авиакосмической промышленности [2–9]. Хромированные покрытия придают изделиям устойчивость к коррозии, износостойкость, стойкость к механическим воздействиям и декоративный вид. Соединения хрома применяют для получения красителей, пигментов и протрав в текстильном, стекольном и керамическом производствах, а также в качестве фунгицидов, ингибиторов коррозии и катализаторов.

Изучение кинетики и механизма процессов растворения хрома и его оксидных фаз определяется необходимостью разработки и совершенствования методик выщелачивания хромосодержащих руд, защиты изделий от коррозии, регенерации оксидов хрома из катализа-

торов, травления окалина с поверхности хромосодержащих сталей [10, 11]. Успешное решение этих задач сдерживается нехваткой экспериментальных исследований и разработок в области растворения оксидов переходных металлов.

Существующие представления о механизме образования, составе и растворении пассивирующих пленок при анодном растворении хрома неоднозначны. Согласно одним утверждениям, возрастание скорости растворения хрома при повышении анодного потенциала объясняется образованием оксида CrO_3 и увеличением его содержания в пассивирующем оксиде с последующим растворением до достижения потенциала перепассивации. Другая точка зрения — повышение анодного тока происходит за счет нарушения пассивирующих слоев на напряженных дефектных участках поверхности электрода при достижении потенциала питтингообразования.

Накопление экспериментальных исследований и развитие представлений в этом направлении является актуальной теоретической и прикладной задачей.

Целью работы являются изучение анодного поведения хрома в кислотной среде при разных значениях водородного показателя pH и моделирование процесса растворения с использованием уравнений химической и электрохимической кинетики.

Методика эксперимента

В качестве исследуемого образца использовали электрод из технического хрома марки Х99Н, изготовленный в виде запрессованного в тефлон цилиндра с рабочей торцевой поверхностью диаметром 0,003 м. Перед измерением

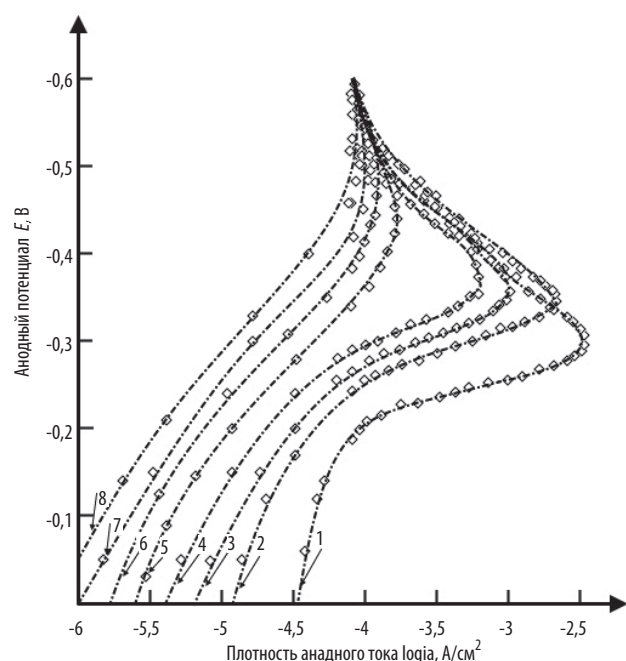


Рис. 1. Поляризационные кривые на хrome при различных значениях pH:
1 — 0,02; 2 — 0,33; 3 — 0,85; 4 — 1,35; 5 — 2,05; 6 — 2,3; 7 — 2,5; 8 — 3,0

торец электрода шлифовали, обезжировали этиловым спиртом и ацетоном. Электрод помещали в трехэлектродную электрохимическую ячейку. В качестве катода использовали платиновый электрод, в качестве электрода сравнения — насыщенный хлоридсеребряный вспомогательный лабораторный электрод ЭВЛ-1М1. Рабочий электрод анодно поляризовали с использованием потенциостата П-5827М. Поляризацию хрома от стационарного значения осуществляли в потенциодинамическом режиме в интервале 2 В со скоростью развертки 40 мВ/с. Измерения проводили при температуре 25 °С, раствор перемешивали магнитной мешалкой со скоростью 500 об/мин. Значения электродных потенциалов пересчитывали по отношению к стандартному водородному электроду. В качестве фонового электролита использовали 0,5 М водный раствор Na_2SO_4 . При исследовании электрохимических характеристик в кислотных растворах готовили растворы серной кислоты (H_2SO_4) со следующими значениями pH: 0,02; 0,33; 0,85; 1,35; 2,05; 2,30; 2,50; 3,00. Рабочие растворы, приготовленные на бидистилляте, в течение 2 ч деаэрировали барботажем химически чистого аргона при температуре 25 °С.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

С момента погружения электрода в раствор и выдержки в течение 10 мин происходил незначительный сдвиг электродного потенциала от установившегося значения (–0,65 В) в положительную сторону.

Анализ полученных вольт-амперных зависимостей при анодной поляризации хрома (**рис. 1**) показал, что коррозионная активность хрома в значительной степени определяется pH раствора. При повышении кислотности среды

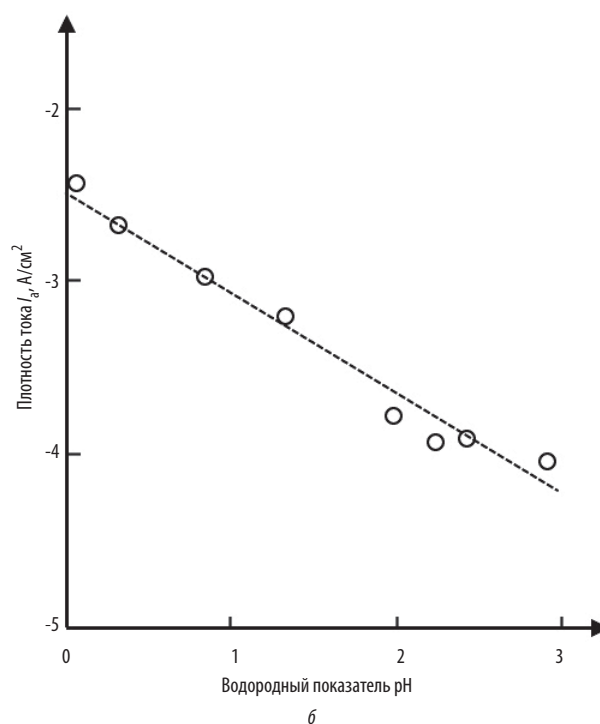
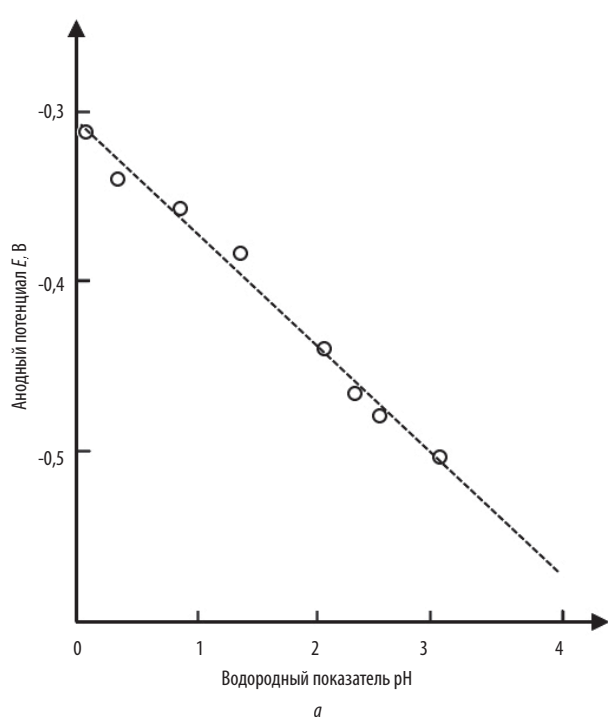


Рис. 2. Зависимость потенциала начала пассивации (а) и тока начала пассивации (б) от pH

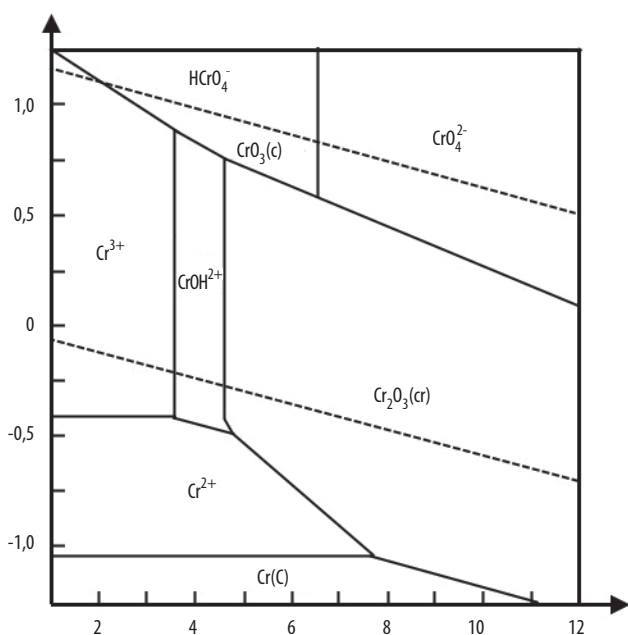


Рис. 3. Диаграмма Пурбэ системы Cr – H₂O ($Cr^{3+} = 0,5 \text{ M}$, $T = 25^\circ \text{C}$)

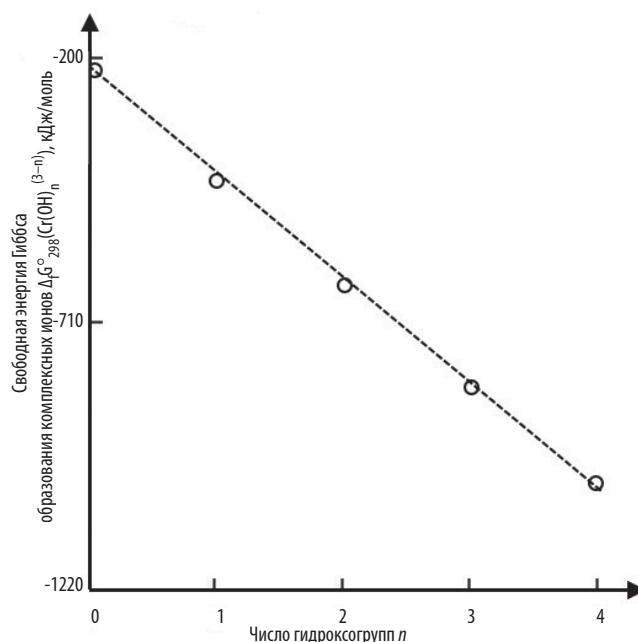


Рис. 4. Зависимость свободной энергии Гиббса образования комплексных ионов $\Delta G_{298}^\circ(Cr(OH)_n^{(3-n)})$ от числа гидроксигрупп n

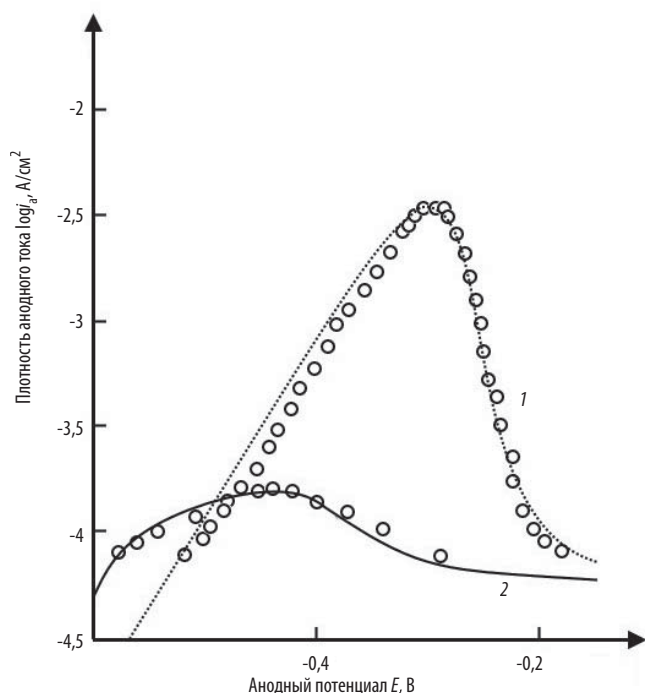


Рис. 5. Результаты моделирования зависимости тока от потенциала при различных значениях pH: 1 — 0,02; 2 — 2,05

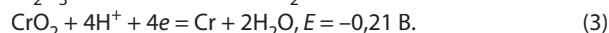
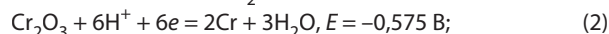
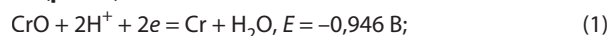
плотность анодного тока и величина его максимума возрастают и регистрируются при более высоких значениях анодных потенциалов, достигая предельных величин.

На начальных участках анодных кривых в области активного растворения хрома при всех значениях pH раствора соблюдается тафелевская зависимость. Величина тангенса угла наклона $E - \log i(b_a)$ в области активного

растворения равна: $b_a = dE/d \log i_a = 0,120 \text{ В}$. Зависимости максимального тока и потенциала начала пассивации от pH раствора (рис. 2, а, б) равны соответственно: $d \log i_{\text{нп}}/d pH = -0,6$; $dE/d pH = 0,066 \text{ В}$. Величина тангенса угла наклона тафелевского участка спада тока $b_a = dE/d \log i_a = 0,049 \text{ В}$. Зависимость величины логарифма тока полной пассивации от pH составляет $d \log i_n/d pH = -0,45$, $dE/d pH = 0,06$.

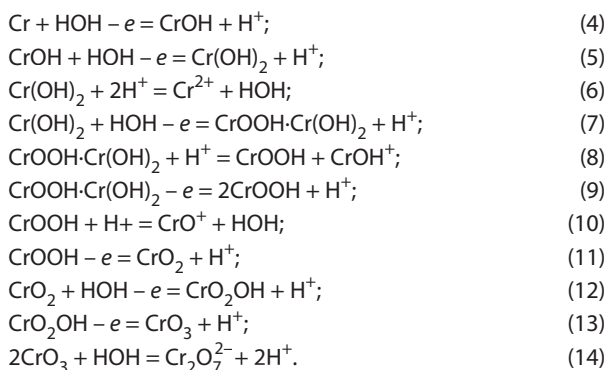
Промежуточными адсорбированными продуктами окисления хрома могут быть оксидные и гидроксидные соединения [12], пассивирующие поверхность электрода и тормозящие анодный процесс.

Зависимость анодного тока от потенциала определяется суммой парциальных токов стадий анодной поляризации хрома (рис. 3):



В соответствии с диаграммами Пурбэ, предоставляющими термодинамическую информацию о коррозионно-электрохимическом поведении хрома, в системе Cr – H₂O присутствуют соединения хрома, включающие гидратированные и негидратированные фазы [13, 14]. На диаграмме (см. рис. 3) выделены области термодинамической устойчивости хрома, образования оксида хрома Cr_2O_3 и его растворения, ионов Cr^{2+} , $CrOH^{2+}$, Cr^{3+} , области существования CrO_2 и CrO_3 и зоны транспассивности, связанные с образованием хромат-ионов.

Приведенная диаграмма не отражает в полной мере многообразия оксидных форм хрома, однако границы их термодинамической устойчивости определяют возможные стадии анодного растворения хрома с образованием в кислотном растворе ионов $Cr_2O_7^{2-}$ [15, 16]:

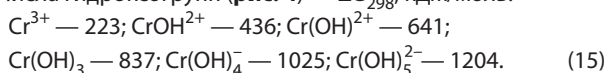


На поверхности электрода возможно образование оксидов и гидроксидов в различной степени окисления хрома: CrOH, Cr(OH)₂, CrOON · Cr(OH)₂, CrOON, CrO₂.

По данным, полученным с использованием инфракрасной спектроскопии [17], на поверхности оксида хрома (III), предварительно выдержанного в растворах электролитов с различными значениями pH, частицами, определяющими скорость растворения, являются Cr³⁺, CrOH²⁺, Cr(OH)₂⁺, Cr(OH)₃, Cr(OH)₄⁻.

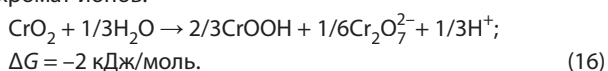
Связь между стандартной энергией Гиббса образования оксидов и их стехиометрическим составом [18, 19] позволяет найти энергии Гиббса реакций образования нестойких оксидов, стандартные потенциалы электродных процессов и построить гипотетическую диаграмму зависимости потенциала от pH.

Методом регрессионного анализа была рассчитана зависимость энергии Гиббса образования $\Delta_f G_{298}^\circ$ (Cr(OH)_n³⁻ⁿ) от числа гидроксогрупп (**рис. 4**) — ΔG_{298}° , кДж/моль:



Результаты моделирования электрохимического растворения хрома [20–26] при удовлетворительном совпадении с полученными экспериментальными данными (**рис. 5**) показывают, что пассивность хрома определяется наличием фаз CrOON и CrO₂.

При дальнейшем повышении потенциала выше 1,0 В оксиды хрома переходят в раствор с образованием бихромат-ионов:



Таким образом, процесс анодного растворения хрома является стадийным с образованием соединений, включающих гидратированные фазы.

Выводы

1. Исследование анодного растворения хрома в водных растворах H₂SO₄ показало сходство в характере анодных кривых при различных значениях pH.

2. Повышение кислотности среды сопровождается активацией анодного растворения хрома и возрастанием плотности анодного тока.

3. На основании анализа экспериментальных и термодинамических данных сделан вывод о стадийном протекании анодного окисления хрома с образованием гидроксокомплексов, состав которых определяется кислотностью электролита.

3. Формирование оксидной пленки происходит через ряд промежуточных гидроксокомплексов. Границы устойчивости оксидных и гидроксидных фаз, образующихся при анодной поляризации хрома, удовлетворительно соответствуют термодинамическим потенциалам перехода.

4. Моделирование электрохимического растворения хрома показало, что пассивность хрома определяется наличием фаз CrOON и CrO₂, что подтверждается спектральными данными.

5. Полученные результаты могут быть учтены при разработке режимов, связанных с растворением хрома в кислотных средах, и использованы при разработке новых технологий выщелачивания хромсодержащих руд с применением электрохимических методов переработки.

ЧМ

Библиографический список

- Шляпнев А. П., Свистунова Т. В., Сорокина Н. А. и др. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: справочник. — М.: Проммет-сплав, 2008. — 336 с.
- Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С., Сидоров В. В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. № 3. С. 47–54.
- Tran V. M., Aguey-Zinsou K. F. Encapsulation of silicotungstic acid into chromium (III) terephthalate metal-organic framework for high proton conductivity membranes // Research on Chemical Intermediates. 2020. Vol. 47, No. 1. P. 61–76.
- Фарафонов Д. П., Серов М. М., Патрушев А. Ю., Лещев Н. Е., Ярошенко А. С. Металлические волокна для новых материалов авиационных двигателей // Труды ВИАМ. 2020. № 12. С. 23–34.
- Zhengping X., Jilei Z., Huiping T., Qingbo A., Hao Z., Jianyong W., Cheng L. Progress of application researches of porous fiber metals // Materials. 2011. No. 4. P. 816–824.
- Sun F. G., Chen H. L., Wu J. H., Feng K. Sound absorbing characteristics of fibrous metal materials at high temperatures // Applied Acoustics. 2010. Vol. 71. P. 221–235.
- Smarsly W., Zheng N., Buchheim C. S., Nindel C., Silvestro C. et al. Advanced high temperature turbine seals materials and designs // Material Science Forum. 2005. Vol. 492–493. P. 21–26.
- Simms N. J., Norton J. F., McColvin G. Performance of candidate gas turbine abradable seal materials in high temperature combustion atmospheres // Materials and Corrosion. 2005. Vol. 56. P. 765–777.
- Waldo Leonard. Chrome-nickel iron and steel products // Iron Age. 1916. Vol. 98. P. 838–839.
- Modi P., Liu W., Aguey-Zinsou K. F. Effect of chromium addition on the reactivation of the titanium-iron-manganese (TiFe0.85Mn0.15) alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2022. Vol. 891. P. 161943.
- Куприянов Н. А., Горичев И. Г. Моделирование выщелачивания с использованием кислотно-основных свойств окисленных минералов в гидрометаллургии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2008. № 3. С. 73–78.
- Blesa M. A. Chemical dissolution of metal oxides. — Boca Raton: CRC Press, 2017. — 434 p.
- Hai-xia You, H. Xu, Yi Zhang, Shi-li Zheng, Yi-Ying Gao. Potential-pH diagrams of Cr-H₂O system at elevated temperatures // Materials Science, Chemistry Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2010. Vol. 20. P. 26–31.
- Kang Wang, Junsoo Han, Angela Yu Gerard, John R. Scully, Bi-Cheng Zhou. Potential-pH diagrams considering complex oxide solution phases for understanding aqueous corrosion of multi-principal element alloys // Materials Degradation. 2020. Vol. 4, Iss. 1.
- Андреев Ю. Я., Сафонов И. А., Дуб А. В. Методы термодинамического расчета состава пассивных пленок на хромсодержащих сталях и сплавах. — М.: Всероссийская конференция «Физико-химические аспекты технологии наноматериалов, их свойства и применение». Сб. тезисов, НИФХИ им. Карпова, 2009. — 127 с.
- Blesa M. A., Weisz A. D., Morando P. J. et al. The interaction of metal oxide surface with complexing agents dissolved in water // Coordination Chemistry reviews. 2000. Vol. 196. P. 31–63.

17. Tuschel D. The correlation method for the determination of spectroscopically active vibrational modes in crystals // *Spectroscopy*. 2015. Vol. 30. P. 17–22.
18. Горичев И. Г., Ключников Н. Г. Зависимость изобарно-изотермического потенциала образования оксидов железа от их состава. — М.: Изд-во Московского педагогического государственного университета, 1972. С. 3–7.
19. Горичев И. Г., Ключников Н. Г. Зависимость стандартных изобарно-изотермических потенциалов некоторых оксидов от их стехиометрического состава // *Журнал физической химии*. 1971. Т. 45, № 5. С. 1099–1102.
20. De-Shehg Kong, Shen-Hao Chen, Chao Wang, Wu Yang. A study of the passive films on chromium by capacitance measurement // *Corrosion Science*. 2008. Vol. 45. P. 747–758.
21. Zhigang W., Lingxue K., Jin B., Zefeng G. Dissolution of Cr₂O₃ into coal slag and its impact on slag flow properties // *Energy and Fuels*. 2020. Vol. 34, Iss. 10. P. 11987–11997.
22. Sarri S., Misaelides P., Zamboulis D., Noli F., Warchol J., Pinakidou F., Katsikini M. Chromium (VI) removal from aqueous solutions using a polyethylenimine-epichlorohydrin resin // *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2016. Vol. 81, No. 11. P. 1321–1333.
23. Плaxотная О. Н., Скворцова И. В., Жукова А. А., Елисеева Е. А., Горичев И. Г. и др. Моделирование процессов растворения оксида хрома (III) и оксида меди в кислых средах // *Вестник Московского университета. Серия 2: Химия*. 2020. Т. 61, № 1. С. 11–18.
24. Елисеева Е. А., Березина С. Л., Болдырев В. С., Чередниченко А. Г. Моделирование процесса растворения оксида железа (III) в кислотной среде // *Черные металлы*. 2020. № 10. С. 15–20.
25. Елисеева Е. А., Березина С. Л., Болдырев В. С., Аверина Ю. М. Влияние морфологии частиц Co₂O₃ на кинетику растворения в электролитах // *Цветные металлы*. 2020. № 11. С. 14–18. DOI: 10.17580/tsm.2020.11.02.
26. Аверина Ю. М., Калякина Г. Е., Меньшиков В. В. и др. Проектирование процессов нейтрализации хромо- и цианосодержащих сточных вод на примере гальванического производства // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Естественные науки*. 2019. № 3. С. 70–80.

"Chemye metallu", 2022, No. 4, pp. 41–45
DOI: 10.17580/chm.2022.04.07

Features of the anodic behavior of chromium in an acidic electrolyte

Information about authors

I. V. Skvortsova, Cand. Chem., Associate Professor, Dept. of Chemistry and Methods of Teaching Chemistry¹, e-mail: i_dorovskih@mail.ru;

E. A. Eliseeva, Cand. Chem., Associate Professor, Dept. of Chemistry², e-mail: yakusheva@bmstu.ru;

S. L. Berezina, Cand. Eng., Associate Professor, Dept. of Chemistry², e-mail: sberezina@bmstu.ru;

V. S. Boldyrev, Cand. Eng., Associate Professor, Dept. of Chemistry, Head of the Dept. of Engineering of Chemical-Technological Systems, Engineering Center for Automation and Robotics³, Master's student³, e-mail: boldyrev.v.s@bmstu.ru

¹ Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russia.

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

³ Mendelev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia.

Abstract: The study of the kinetic features of the dissolution of chromium is relevant in connection with its wide application in steels and alloys, strength and corrosion-resistant coatings, in electronic engineering and many other industries. In connection with the depletion and decrease in the reserves of chromium-containing ores, the creation of new highly efficient technologies for their processing is of paramount importance. Along with topical issues of optimization of technologies for chemical etching, leaching and enrichment of chromium-containing ores, the development of combined chemical-electrochemical methods, the development of the theory and practice of electrochemical methods of processing mineral raw materials are promising. The paper presents the results of studying the features of the anodic behavior of chromium in an acidic environment. An aqueous solution of sulfuric acid was used as a working solution. The dependence of the kinetics of dissolution of the anodic dissolution of chromium on the acidity of the electrolyte was established by the potentiodynamic method. Based on the analysis of experimental and thermodynamic data, it was concluded that the process proceeded in stages with the formation of chromium hydroxo complexes, and the mechanism of its anodic dissolution. The data obtained expand the understanding of the electrochemical behavior of chromium and can be taken into account when developing regimes for leaching chromium-containing ores and processes associated with the dissolution of chromium in acidic media.

Key words: chromium oxides, electrode potential, polarization curves, anodic dissolution, hydroxo complexes, anodic current density.

References

1. Shlyamnev A. P., Svistunova T. V., Sorokina N. A. et al. Corrosion-resistant, heat-resistant and high-strength steels and alloys: reference book. Moscow: Prommet-splav, 2008. 336 p.
2. Kablov E. N., Ospennikova O. G., Lomberg B. S., Sidorov V. V. Priority directions for the development of technologies for production of heat-resistant materials for aircraft engine-building. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*. 2013. No. 3. pp. 47–54.
3. Tran V., M. Aguey-Zinsou K. F. Encapsulation of silicotungstic acid into chromium (III) terephthalate metal-organic framework for high proton conductivity membranes. *Research on Chemical Intermediates*. 2020. Vol. 47. No. 1. pp. 61–76.
4. Farafonov D. P., Serov M. M., Patrushev A. Yu., Leshchev N. E., Yaroshenko A. S. Metal fibers for novel aircraft engine materials. *Trydy VIAM*. 2020. No. 12. pp. 23–34.
5. Zhengping X., Jilei Z., Huiping T., Qingbo A., Hao Z., Jianyong W., Cheng L. Progress of application researches of porous fiber metals. *Materials*. 2011. No. 4. pp. 816–824.
6. Sun F. G., Chen H. L., Wu J. H., Feng K. Sound absorbing characteristics of fibrous metal materials at high temperatures. *Applied Acoustics*. 2010. Vol. 71. pp. 221–235.
7. Smarsly W., Zheng N., Buchheim C. S., Nindl C., Silvestro C. et al. Advanced high temperature turbine seals materials and designs. *Material Science Forum*. 2005. Vol. 492–493. pp. 21–26.
8. Simms N. J., Norton J. F., McColvin G. Performance of candidate gas turbine abradable seal materials in high temperature combustion atmospheres. *Materials and Corrosion*. 2005. Vol. 56. pp. 765–777.
9. Waldo L. Chrome-nickel iron and steel products. *Iron Age*. 1916. Vol. 98. pp. 838–839.
10. Modi P., Liu W., Aguey-Zinsou K. F. Effect of chromium addition on the reactivation of the titanium-iron-manganese (TiFe0.85Mn0.15) alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 891. p. 161943.
11. Kipriyanov N. A., Gorichev I. G. Modeling the leaching using the acid-base properties of oxidized minerals in hydrometallurgy. *Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya*. 2008. No. 3. pp. 73–78.
12. Blesa M. A. Chemical dissolution of metal oxides. Boca Raton: CRC Press, 2017. 434 p.
13. Hai-xia You, H. Xu, Yi Zhang, Shi-li Zheng, Yi-Ying Gao. Potential-pH diagrams of Cr-H₂O system at elevated temperatures. *Materials Science, Chemistry Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2010. Vol. 20. pp. 26–31.
14. Kang Wang, Junsoo Han, Angela Yu Gerard, John R. Scully, Bi-Cheng Zhou. Potential-pH diagrams considering complex oxide solution phases for understanding aqueous corrosion of multi-principal element alloys. *Materials Degradation*. 2020. Vol. 4. Iss. 1.
15. Andreev Yu. Ya., Safonov I. A., Dub A. V. Methods for thermodynamic calculation of the composition of passive films on chromium-containing steels and alloys. *Moscow: All-Russian conference "Physical and chemical aspects of nanomaterials technology, their properties and applications"*. Collection of abstracts, Karpov NIFKhI, 2009. 127 p.
16. Blesa M. A., Weisz A. D., Morando P. J. et al. The interaction of metal oxide surface with complexing agents dissolved in water. *Coordination Chemistry reviews*. 2000. Vol. 196. pp. 31–63.
17. Tuschel D. The correlation method for the determination of spectroscopically active vibrational modes in crystals. *Spectroscopy*. 2015. Vol. 30. pp. 17–22.
18. Gorichev I. G., Klyuchnikov N. G. Dependence of the isobaric-isothermal potential of the formation of iron oxides on their composition. Moscow: Izdatelstvo Moskovskogo pedagogicheskogo gosudarstvennogo universiteta. 1972. pp. 3–7.
19. Gorichev I. G., Klyuchnikov N. G. Dependence of standard isobaric-isothermal potentials of some oxides on their stoichiometric composition. *Zhurnal fizicheskoy khimii*. 1971. Vol. 45. No. 5. pp. 1099–1102.
20. De-Shehg Kong, Shen-Hao Chen, Chao Wang, Wu Yang. A study of the passive films on chromium by capacitance measurement. *Corrosion Science*. 2008. Vol. 45. pp. 747–758.
21. Zhigang W., Lingxue K., Jin B., Zefeng G. Dissolution of Cr₂O₃ into coal slag and its impact on slag flow properties. *Energy and Fuels*. 2020. Vol. 34. Iss. 10. pp. 11987–11997.
22. Sarri S., Misaelides P., Zamboulis D., Noli F., Warchol J. Chromium (VI) removal from aqueous solutions using a polyethylenimine-epichlorohydrin resin. *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2016. Vol. 81, No. 11. pp. 1321–1333.
23. Plakhotnaya O. N., Skvortsova I. V., Zhukova A. A., Eliseeva E. A., Gorichev I. G. et al. Modeling of processes of chromium oxide (III) and copper oxide dissolution in acidic media. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2: Khimiya*. 2020. Vol. 61. No. 1. pp. 11–18.
24. Eliseeva E. A., Berezina S. L., Boldyrev V. S., Cherednichenko A. G. Modeling the process of dissolution of iron oxide Fe₂O₃ in an acidic environment. *Chemye Metallu*. 2020. No. 10. pp. 15–20.
25. Eliseeva E. A., Berezina S. L., Boldyrev V. S., Averina Yu. M. Influence of the morphology of Co₂O₃ particles on the dissolution kinetics in electrolytes. *Tsvetnye Metallu*. 2020. No. 11. pp. 14–18.
26. Averina Yu. M., Kalyakina G. E., Menshikov V. V. et al. Neutralization process design for electroplating industry wastewater containing chromium and cyanides. *Herald of Bauman State Technical University. Series Natural Sciences*. 2019. No. 3. pp. 70–80.