

Тарасова Наталия Владимировна

**ВЛИЯНИЕ МЕЖФАЗНЫХ И МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦ
НЕЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ НА ИХ АНОДНОЕ РАСТВОРЕНИЕ
В СЕРНОКИСЛОЙ СРЕДЕ**

Специальность 05.17.03 – технология электрохимических процессов
и защита от коррозии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат химических наук, доцент
Салтыков Сергей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор химических наук, профессор
Калужина Светлана Анатольевна
кандидат технических наук, доцент
Ширяев Владимир Юрьевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Воронежская государственная
технологическая академия»

Защита состоится _____ 2009 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.260.06 в ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» по адресу: 392000, Тамбов, ул. Ленинградская, 1, аудитория 17.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Тамбовского государственного технического университета.

Автореферат разослан _____ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат химических наук

Зарапина И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное развитие производства предъявляет высокие требования к коррозионной стойкости и совершенствованию методов защиты конструкционных материалов, основными из которых являются сплавы на основе железа – углеродистые и низколегированные стали. В основе коррозионного разрушения сталей лежат закономерности электрохимического поведения структурных и фазовых составляющих, определяющих их микроструктуру. Анодные электрохимические процессы, таким образом, развиваются на гетерофазной поверхности, которая в случае железоуглеродистых сплавов является двухфазной феррито-цементитной. В последнее время наблюдается существенный рост научного интереса к кинетике таких процессов, что связано во многом с развитием новых физических методов изучения как состояния поверхности в целом, так и внутреннего строения отдельных фазовых или структурных составляющих. Применительно к железоуглеродистым сплавам факторами, существенно усложняющими развитие кинетики их анодного растворения, являются, с одной стороны, многообразие их микроструктур при постоянном химическом составе, определяющихся формой и распределением цементитной фазы, а с другой – принадлежность системы «Fe – C» к типу «металл – неметалл», что затрудняет термодинамическое описание. Например, известно, что если ферритная составляющая сталей переходит в раствор с образованием ионов Fe^{2+} , то цементит может растворяться по двум механизмам: с образованием аморфного углерода в виде нерастворимого осадка или углеводородов, удаляющихся с поверхности. Такая неоднозначность затрудняет интерпретацию и обобщение результатов электрохимических измерений на железоуглеродистых сплавах и требует детального исследования. Кроме цементитной составляющей к элементам микроструктуры сталей относят межфазные границы феррит/цементит, межзеренные границы феррит/феррит, тело зерна структурно-свободного феррита. Если последний отождествляют с чистым железом, то роль границ, являющихся скоплением дефектов, представляется неоднозначной.

Известно, что зарождение анодного растворения происходит на определенных «активных участках» поверхности, обладающих повышенным уровнем энергии. В ряде работ отечественных и зарубежных исследователей предприняты попытки изучения связи распределения активных участков растворения по поверхности гетерофазного электрода с его микроструктурой, хотя сама сущность такой связи давно нашла широкое эмпирическое применение в практике металлографической визуализации микроструктуры путем химического или электрохимического травления. В основе такой визуализации лежит селективность и различная скорость растворения отдельных элементов структуры, что приводит к формированию микрорельефа. Развитие исследований в этом направлении в последние десятилетия обусловлено возросшими возможностями таких методов изучения состояния поверхности, как атомно-силовая микроскопия и компьютерные сканер-технологии.

Таким образом, изучение влияния элементов микроструктуры сталей на их анодное поведение и установление связи между электрохимическими харак-

теристиками сплава и количественными параметрами микроструктуры является актуальным.

Цель: разработка модели анодного растворения сталей с феррито-перлитной и перлитной микроструктурами, учитывающей электрохимическое поведение тела зерна феррита, пластинчатого и зернистого цементита, а также межфазных и межзеренных границ.

Задачи:

1. Определить удельные скорости анодного растворения структурно-свободного феррита и ферритных матриц пластинчатого и зернистого перлита.
2. Выявить распределение активных участков процесса саморастворения по поверхности феррито-цементитного сплава.
3. Установить последовательность анодного растворения межфазных границ феррит/цементит, межзеренных границ феррит/феррит и тела зерна структурно-свободного феррита при поляризации сплава, а также определить интервалы токов, соответствующих растворению каждого элемента микроструктуры.
4. Исследовать влияние дефектности строения сплава со структурой феррита на последовательность растворения границ феррит/феррит и тела зерна феррита.
5. Изучить процесс анодного растворения цементита в условиях стационарного растворения феррита.

Научная новизна

Рассчитаны удельные скорости анодного растворения структурно-свободного феррита и ферритных матриц пластинчатого и зернистого перлита. Установлено преобладание тока растворения структурного феррита над скоростью растворения ферритной матрицы перлита.

Исследовано распределение активных участков саморастворения по элементам микроструктуры железоуглеродистого сплава. Выявлено, что процесс саморастворения перлитных сталей начинается на межфазных границах феррит/цементит, а феррито-перлитных – локализуется на поверхности зерна феррита или перлита в зависимости от соотношения их диаметров.

Установлена последовательность электрохимического растворения тела зерна структурно-свободного феррита, границ феррит/цементит и феррит/феррит при поляризации сплавов. Показана ее зависимость от соотношения диаметров зерен феррита и перлита. Выявлено преобладание скорости растворения структурного феррита над ферритной матрицей перлита и границ феррит/феррит над границами феррит/цементит.

Изучено влияние дефектности однофазного сплава на последовательность растворения границ феррит/феррит и тела зерна феррита. Установлена смена последовательности растворения «тело зерна феррита – границы феррит/феррит» на обратную с ростом степени равноосности микроструктуры.

Изучен процесс анодного растворения пластинчатого цементита в условиях потенциостатической поляризации. Показано, что разрушение цементита

начинает развиваться по его дефектным плоскостям и приводит к формированию нерастворимого осадка на перлитной составляющей микроструктуры.

Предложена обобщенная модель анодного растворения сталей с ферритной, феррито-перлитной и перлитной микроструктурами.

Практическая значимость работы

Значения удельных скоростей анодного растворения структурно-свободного феррита и ферритной матрицы перлита, а также результаты исследования процессов саморастворения могут служить основой для оценки скорости электрохимической коррозии нелегированных сталей с содержанием углерода до 1.2 масс.% на базе металлографических измерений.

Данные о распределении активных участков саморастворения в совокупности с последовательностью растворения элементов микроструктуры и соответствующими им интервалами токов могут быть использованы для оптимизации электрохимических методов визуализации микроструктуры путем травления.

Результаты исследования влияния дефектности микроструктуры на скорость растворения тела зерна и межзеренных границ могут быть использованы для оценки и прогнозирования скорости коррозии стали после ее механической обработки по степени равноосности микроструктуры.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты расчета удельных скоростей анодного растворения структурно-свободного феррита и ферритных матриц пластинчатого и зернистого перлита;
- закономерности распределения активных участков по поверхности сталей в результате их саморастворения;
- последовательность анодного растворения элементов ферритной, феррито-перлитной и перлитной микроструктур при поляризации, значения токов, отвечающих началу растворения границ феррит/феррит и тела зерна феррита сплавов с ферритной и феррито-перлитной микроструктурами;
- данные о влиянии дефектности ферритной структуры на последовательность анодного растворения границ феррит/феррит и тела зерна феррита;
- влияние субструктуры пластинчатого цементита на его анодное растворение в условиях потенциостатической поляризации;
- обобщенная модель анодного растворения сплавов с различными типами микроструктур, учитывающая присутствие межфазных и межзеренных границ и особенности строения ферритной и цементитной фаз.

Апробация работы. Результаты работы были доложены на XIV и XV Международных конференциях молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2007» и «Ломоносов-2008», г. Москва; Международной конференции «Нанотехнологии и наноматериалы в металлургии», г. Москва, 2008 г; II Международном Форуме «Аналитика и аналитики», г. Воронеж, 2008 г; III и IV Всероссийских конференциях «Физико-химические процессы в конденсированном состоянии и на межфазных границах» ФАГРАН-2006 и ФАГРАН-2008, г. Воронеж; Всероссийской конференции «Электрохимия и экология», г. Ново-

черкасск, 2008 г. и Всероссийской конференции «Актуальные проблемы естественных наук и их преподавание», г. Липецк, 2006 г.

Работа была отмечена дипломом на XIV Международной конференции молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2007».

Публикации. Полученные результаты изложены в 15 работах, в том числе 9 статьях, из которых 4 в журналах, рекомендуемых ВАК для публикации материалов диссертации [1-4], и 6 тезисах докладов.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, списка литературы из 121 наименования и приложения, содержит 25 таблиц и 91 рисунок, изложена на 162 страницах машинописного текста.

Автор работы искренне благодарна доценту кафедры физического металловедения ЛГТУ к.т.н. Торопцевой Елене Львовне за консультативную помощь в материаловедческой части эксперимента и доценту кафедры автоматизированных систем управления ЛГТУ к.т.н. Ведищеву Виталию Викторовичу за математическую обработку спектров яркости компьютерных изображений поверхности.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражено современное состояние теории электрохимических процессов на гетерофазных поверхностях на примере железоуглеродистых сплавов с феррито-цементитной микроструктурой и обоснована актуальность поставленной цели.

В первой главе представлен обзор литературы, в котором рассмотрены современные представления о микростроении ферритной и перлитной составляющих стали, межфазных и межзеренных границ. Рассмотрено коррозионное поведение однофазного сплава со структурой феррита и показана зависимость коррозионной стойкости трубных и инструментальных сталей от количества перлитной составляющей с различной формой цементита в их микроструктуре. Представлены схемы анодного растворения чистого железа в сернокислой среде и рассмотрены кристаллографические особенности электрохимического растворения гетерофазного сплава. Показано, что формирование активных участков анодного растворения сплава определяется дислокационным строением его структурных составляющих. Проанализированы особенности процесса электрохимического растворения цементита в кислотах и его влияние на коррозионное поведение сталей.

Анализ литературных данных показал, что процесс формирования активных участков растворения и последующее растворение стали определяются дефектным строением элементов ее микроструктуры, имеющим дислокационный характер. Предложенные схемы механизма анодного растворения железа не учитывают особенности его микростроения и не могут быть перенесены на не легированные феррито-цементитные сплавы из-за присутствия цементита. Результаты анализа литературы позволили сформулировать цель исследования и обосновать его научную новизну и практическую значимость.

Во второй главе представлена характеристика объектов и методов исследования. В качестве объектов использовали железоуглеродистые сплавы с

содержанием углерода от 0.017 до 1.200 масс% (табл. 1), микроструктура которых включает такие элементы, как тело зерна структурно-свободного феррита, перлит, состоящий из чередующихся пластин феррита и цементита, межфазные границы феррит/цементит и межзеренные границы феррит/феррит. Для получения структуры зернистого цементита образцы подвергали дополнительной термической обработке. Подготовка рабочей поверхности включала шлифовку и полировку до зеркального блеска. Электрохимические исследования проводили в сернокислых растворах состава $x\text{H}_2\text{SO}_4 + y\text{Na}_2\text{SO}_4$ ($x + y = 0.01$ моль/л, pH 1.8÷6.4) методами потенциостатической и потенциодинамической вольтамперометрии, хронопотенцио- и хроноамперометрии.

Таблица 1. Содержание углерода, структура¹ и площадь поверхности², занимаемая ферритной фазой в исследуемых сплавах

Образец	C, масс. %	Структура	S _{общ} , %	S _{ф(стр)} , %	S _{ф(ПП)} , %	S _{ф(ЗП)} , %
Армко-железо (АЖ)	0.017	Ф	99.835	99.835	отс.	отс.
Сталь 3сп	0.200	Ф+ПП+ЗП	97.089	77.419	9.835	9.835
Сталь 35	0.330	Ф+ПП	95.138	60.645	34.493	отс.
Сталь 60	0.614	Ф+ПП	90.876	24.000	66.876	отс.
		Ф+ПП+ЗП			33.438	33.438
		ЗП			отс.	90.876
Сталь У8	0.750	ПП	88.836	отс.	88.836	отс.
		ПП+ЗП			36.423	52.413
Сталь 85	0.910	ЗП	86.435	отс.	отс.	86.435
Сталь У12	1.200	ЗП	82.083	отс.	отс.	82.083

Состояние рабочей поверхности после анодного растворения изучали методами оптической (микроскоп МИМ-8М) и атомно-силовой (микроскоп Solver P47-PRO) микроскопии. Для определения дисперсности и размера цементита использовали электронную просвечивающую микроскопию (микроскоп ЭМ-200). В отдельных случаях применяли химическое травление поверхности образцов в азотнокислом (1÷3 %) спиртовом растворе.

Третья глава посвящена изучению процесса анодного растворения ферритной фазы железоуглеродистых сплавов при небольших перенапряжениях. Установлено, что характер анодных вольтамперограмм всех сплавов при перенапряжениях (ΔE) до 200 мВ однотипный, а сами кривые в отдельных случаях сливаются. Поэтому для изучения влияния геометрической формы второй фазы на скорость растворения применяли метод оценки статистической значимости отличий. В качестве анализируемых величин использовали анодный ток ($i_{\Delta E=const}$) при различных перенапряжениях относительно стационарного потенциала. Изучаемые стали разделяли на группы в зависимости от формы перлита. Кроме того, в каждую группу добавляли армко-железо. Принцип выявления значимости отличия $i_{\Delta E=const}$ разных сталей состоял в их последовательном парном сравнении друг с другом.

¹ Ф – феррит, ПП – пластинчатый перлит, ЗП – зернистый перлит

² S_{общ}, S_{ф(стр)}, S_{ф(ПП)} и S_{ф(ЗП)} – площади, занимаемые фазой феррита в целом, структурно-свободным ферритом и ферритной матрицей пластинчатого и зернистого перлита

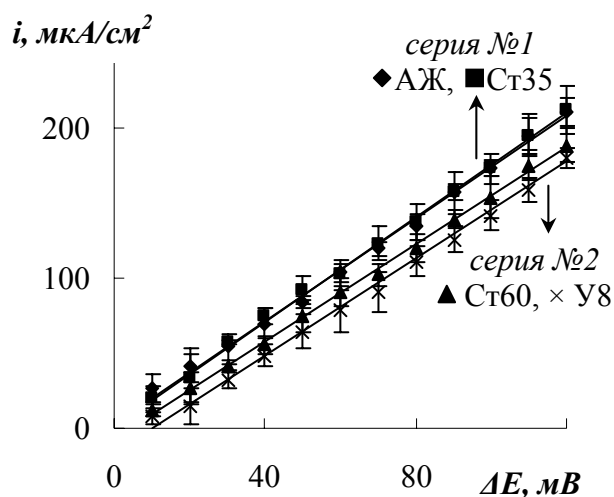


Рис. 1. Вольтамперные зависимости сплавов с пластинчатым перлитом

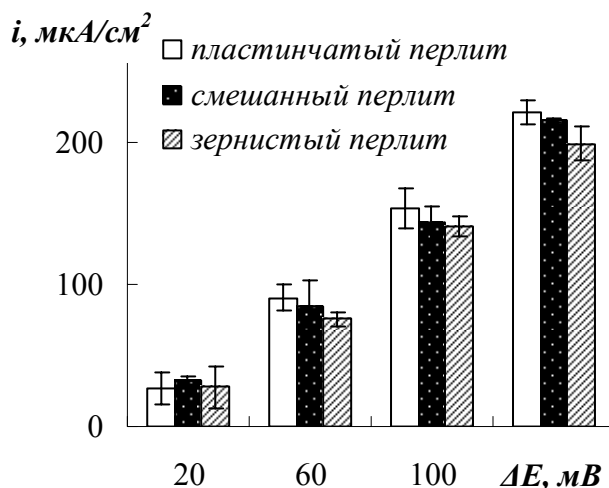


Рис. 2. Скорости анодного растворения стали 60 с перлитом различной формы

Результаты показали, что для каждой из форм перлита вольтамперограммы ложатся двумя статистически различными сериями (рис. 1):

- перлит пластинчатый: *серия №1* – армко-железо, Ст35; *серия №2* – Ст60, У8;
- перлит смешанный: *серия №1* – армко-железо, СтЗсп; *серия №2* – Ст60, У8;
- перлит зернистый: *серия №1* – армко-железо; *серия №2* – Ст60, 85, У12.

Для изучения влияния формы перлита на скорость анодного растворения сплава использовали сталь 60, термической обработкой в которой получали микроструктуру перлита пластинчатой, зернистой или смешанной формы. Результаты показали (рис. 2), что наименьшую скорость растворения имеет сталь с зернистым перлитом, а наибольшую – с пластинчатым. Сталь со смешанным цементитом занимает промежуточное положение, что связано с металлографическими особенностями феррито-перлитной структуры и зернистого перлита.

Объяснение полученных результатов базируется на представлении о дислокационном строении структурно-свободного феррита и ферритной матрицы перлита. Между цементитными пластинами наблюдается дислокационная субструктура, разделяющие ферритные промежутки на отдельные ячейки. Сфероидизация цементита приводит к изменению дислокационной субструктуры, формирование которой при этом контролируется масштабным фактором, т.е. критическим значением межпластинчатого расстояния, когда наблюдается хаотичное распределение отдельных дислокаций. Очевидно, это и происходит в нашем случае при образовании структуры зернистого перлита с размером цементитных глобул менее 0.5 мкм. Учитывая, что анодное растворение осуществляется преимущественно в местах выхода дислокаций на поверхность кристалла, можно утверждать, что найденное снижение суммарной скорости анодного растворения стали 60 при переходе к зернистому цементиту связано с изменением дислокационного строения ферритной матрицы перлита и уменьшением напряжений на границе феррит/цементит.

Для разделения процессов растворения структурно-свободного феррита и феррита в пластинчатом и зернистом перлите нами проведено математическое моделирование вольтамперограмм. Можно принять, что в зависимости от мик-

роструктуры сплава суммарная скорость растворения феррита (I_ϕ) описывается следующими уравнениями:

$$\text{Феррит} + \text{пластинчатый перлит: } I_\phi = S_{\phi(\text{cmp})} \cdot i_{\phi(\text{cmp})} + S_{\phi(\text{ПП})} \cdot i_{\phi(\text{ПП})}, \quad (1)$$

$$\text{Зернистый перлит: } I_\phi = S_{\phi(\text{ЗП})} \cdot i_{\phi(\text{ЗП})}, \quad (2)$$

$$\text{Феррит} + \text{смешанный перлит: } I_\phi = S_{\phi(\text{cmp})} \cdot i_{\phi(\text{cmp})} + S_{\phi(\text{ПП})} \cdot i_{\phi(\text{ПП})} + S_{\phi(\text{ЗП})} \cdot i_{\phi(\text{ЗП})}, \quad (3)$$

где $i_{\phi(\text{cmp})}$, $i_{\phi(\text{ПП})}$ и $i_{\phi(\text{ЗП})}$ – удельные скорости анодного растворения структурно-свободного феррита и феррита в пластинчатом и зернистом перлите;

$S_{\phi(\text{cmp})}$, $S_{\phi(\text{ПП})}$ и $S_{\phi(\text{ЗП})}$ – площади, занимаемые структурно-свободным ферритом и ферритом в пластинчатом и зернистом перлите с учетом площади поверхности электрода.

Цель расчета состояла в определении удельных скоростей анодного растворения феррита различных форм, т.е. величин $i_{\phi(\text{cmp})}$, $i_{\phi(\text{ПП})}$, $i_{\phi(\text{ЗП})}$. Уравнения (1)–(3) образуют систему, решая которую с использованием металлографических характеристик ($S_{\phi(\text{cmp})}$, $S_{\phi(\text{ПП})}$, $S_{\phi(\text{ЗП})}$ в табл. 1) и величин I_ϕ , равных экспериментально наблюдаемым токам ($I_{\text{набл}}$) на сплавах при различных перенапряжениях, мы получили искомые расчетные значения. Сопоставление расчетных и экспериментально-наблюдаемых величин I_ϕ показало их совпадение во всем диапазоне ΔE (табл. 2), что подтверждает правильность полученных значений $i_{\phi(\text{cmp})}$, $i_{\phi(\text{ПП})}$, $i_{\phi(\text{ЗП})}$. Найденные значения токов во всем диапазоне ΔE образуют расчетные вольтамперные кривые всех форм феррита (рис. 3).

Таблица 2. Значения расчетных ($I_{\text{расч}}$) и экспериментально наблюдаемых ($I_{\text{набл}}$) величин анодного тока, мкА

ΔE , мВ	Сталь 3сп		Сталь 60 (ЗП)		Сталь У12	
	$I_{\text{расч}}$	$I_{\text{набл}}$	$I_{\text{расч}}$	$I_{\text{набл}}$	$I_{\text{расч}}$	$I_{\text{набл}}$
20	11.46±2.97	9.50±0.68	10.72±2.78	7.80±4.06	9.69±2.51	7.27±2.72
60	28.42±1.68	24.67±1.57	26.60±1.57	21.33±1.50	24.03±1.42	22.33±2.85
100	47.38±1.37	45.00±1.18	44.35±1.28	39.73±1.93	40.06±1.16	39.80±3.13
140	65.56±2.66	65.83±1.96	61.37±2.49	56.20±3.39	55.43±2.25	58.33±4.37

Установлено, что скорость растворения ферритной составляющей структуры (рис. 3, линия 1) преобладает над остальными, что связано с наличием границ между зернами феррита, свободная энергия которых увеличивает общую энергию поликристаллического тела. Кроме границ зерен в реальном ОЦК-кристалле, имеющем несколько действующих систем скольжения дислокаций, наблюдаются границы субзерен, строение которых описывают в виде стенки краевых или сетки винтовых дислокаций. В то же время в феррит-

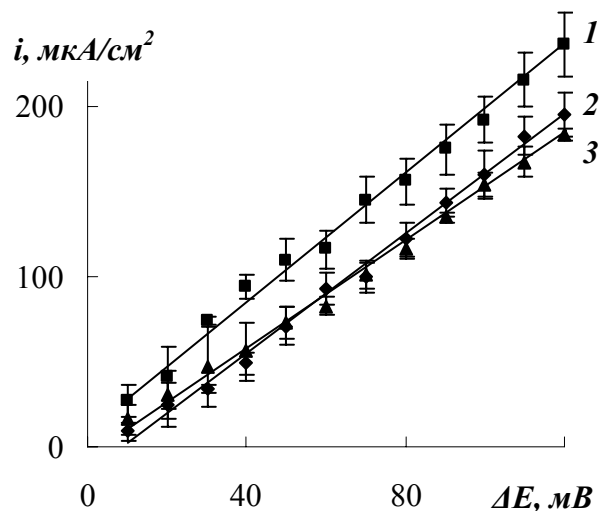


Рис. 3. Расчетные вольтамперные зависимости ферритной составляющей структуры (1), феррита в пластинчатом (2) и зернистом (3) перлите

ной матрице пластинчатого перлита возможно отсутствие субзеренной структуры при размере ферритных слоев, соизмеримых с длиной свободного пробега дислокаций в феррите. В случае пластинчатого перлита сетки дислокаций на межфазной границе феррит/цементит создают в ферритной матрице поля упругих напряжений, периодически изменяющихся вдоль направления, параллельного плоскости межфазной границы. В то же время, сфероидизация цементита приводит к снижению внутренних напряжений в ферритной матрице перлита, что является причиной уменьшения скорости анодного растворения феррита в зернистом перлите по сравнению с ферритом в пластинчатом перлите.

В четвертой главе представлены результаты исследования процессов саморастворения сплавов и последовательности анодного растворения тела зерна структурно-свободного феррита, межфазных границ феррит/цементит и межзеренных границ феррит/феррит при анодной поляризации. Установлено, что зависимости потенциала свободной коррозии ($E_{кор}$) всех исследуемых сплавов от pH содержат минимум при pH около 4 (рис. 4а). Это значение хорошо коррелирует с тем, при котором известна смена механизма электрохимического растворения чистого железа. Расчет тафелевых наклонов (b_a) для армко-железа со структурой чистого феррита в исследуемом интервале pH действительно выявил наличие двух значений b_a , соответствующих механизмам Хойслера (рис. 5а) и Бокриса (рис. 5б).

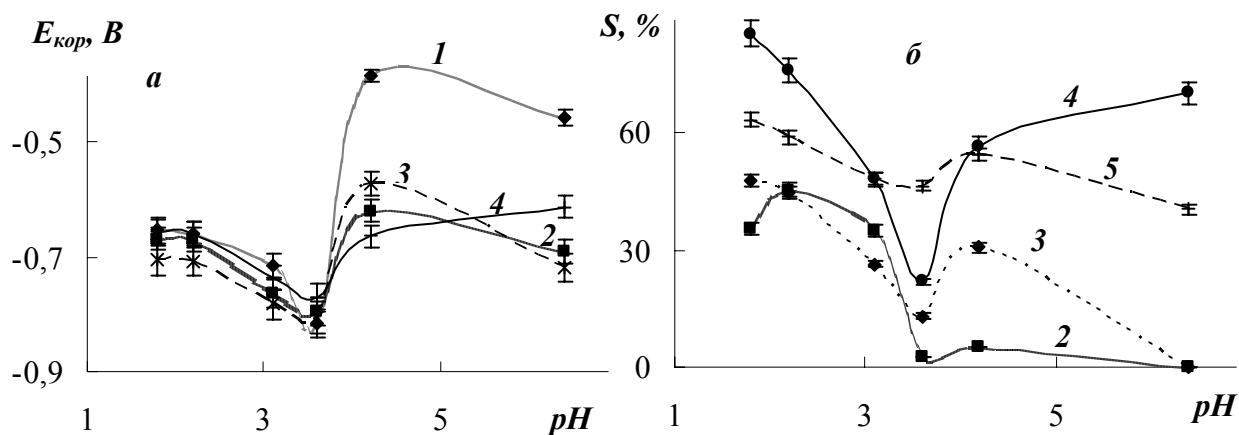


Рис. 4. Зависимости потенциала свободной коррозии (а) и доли площади, подверженной саморастворению (б), от pH для армко-железа (1) и сталей 20 (2), 45 (3), У8 (4) и У12 (5)

Появление цементитной фазы в структуре сталей приводит к изменению их потенциала свободной коррозии относительно армко-железа, имеющего чистую ферритную структуру. По значениям $E_{кор}$, применяя методы математической статистики, получили, что исследуемые сплавы образуют три группы: стали 20 и 40; стали 35 и 45; стали 60, У8 и У12.

Установлено, что значения потенциала армко-железа во всем интервале pH находятся за пределами найденных групп, а разделение структурно-однотипных феррито-перлитных сталей 20, 35, 40 и 45 на две группы связано с такой характеристикой микроструктуры, как соотношение диаметров зерен феррита (D_{ϕ}) и перлита (D_{Π}): для сталей 20 и 40 выполняется условие – $D_{\Pi} < D_{\phi}$, а для сталей 35 и 45 – $D_{\Pi} > D_{\phi}$.

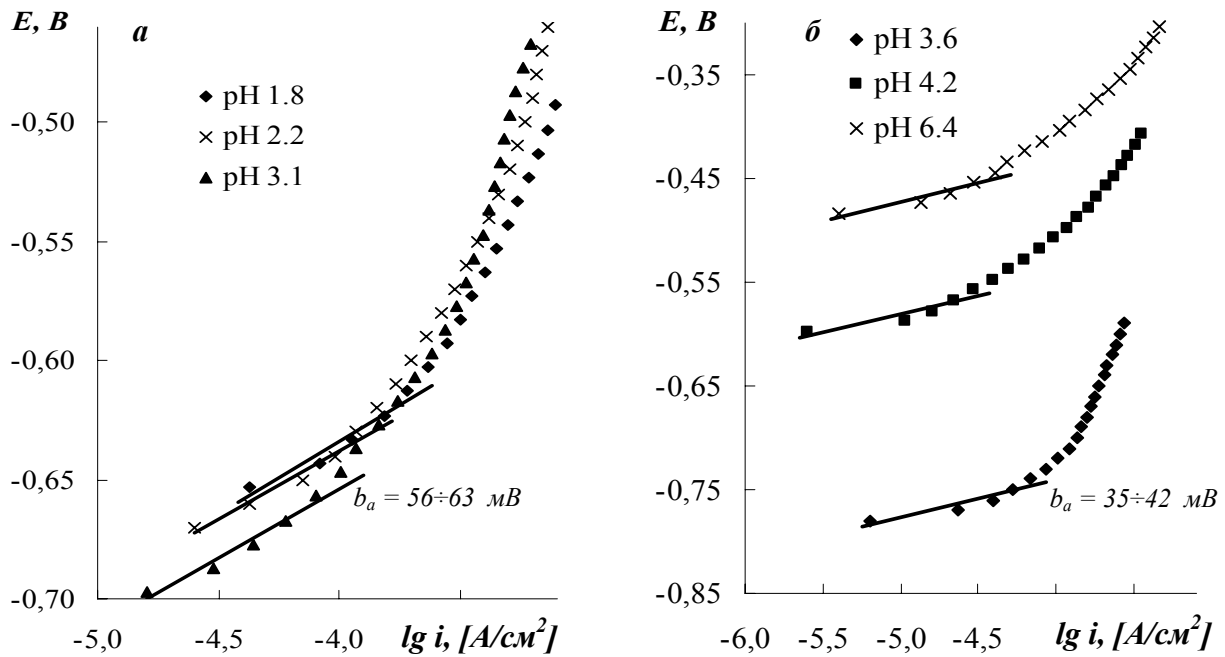


Рис. 5. Полулогарифмические вольтамперные зависимости армко-железа, pH 1.8÷6.4

Исследование поверхности образцов после бестоковой выдержки в растворе в течение 5 мин показало, что на сплавах с феррито-перлитной и перлитной структурами происходит выявление перлита, которое связано с растворением только межфазных границ феррит/цементит, в результате высокой плотности дислокаций. В то же время саморастворение межзеренных границ феррит/феррит не наблюдается.

Исходя из субъективности оптического исследования поверхности, для количественной оценки изменений, протекающих в ходе электрохимического растворения, использовали компьютерную сканер-технология, в основе которой лежит представление цифрового изображения в матричной форме и в виде спектра яркости в координатах «номер пиксела – яркость». Считается, что величина яркости каждого пиксела пропорциональна глубине растворения соответствующей точки поверхности (рис. 6). Результаты позволили оценить площадь поверхности (S), подверженной саморастворению, зависимость которой от pH (рис. 4б) качественно идентична аналогичной зависимости потенциала свободной коррозии (рис. 4а).

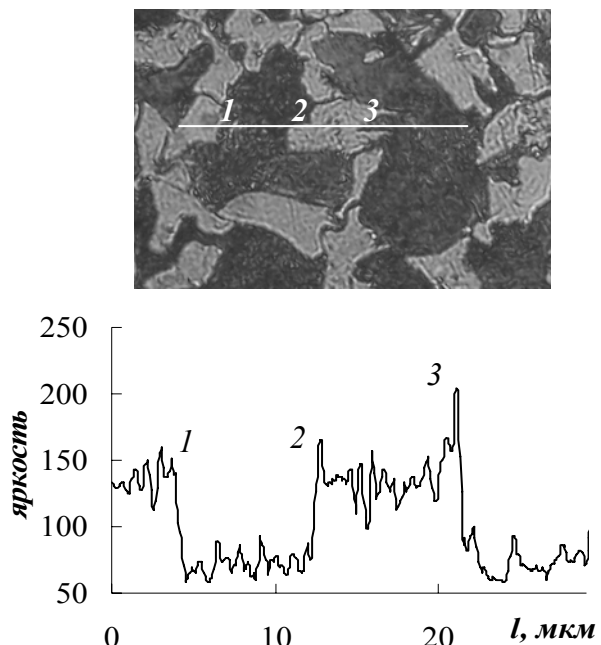


Рис. 6. Микроструктура стали 20 и профиль поверхности вдоль секущей, полученный с использованием программы ImageJ

Наложение внешней анодной поляризации приводит к формированию дополнительных активных участков и развитию анодного растворения, начинающегося на межфазных границах феррит/цементит. Результатом такого процесса является разрушение отдельных элементов микроструктуры, которое изучали методами оптической и атомно-силовой микроскопии. Для исследования распределения активных участков по элементам микроструктуры осуществляли потенциостатическую поляризацию образцов с предварительно выявленной микроструктурой путем классического азотнокислого травления, что позволило проследить, на каких именно участках микроструктуры происходит формирование активных участков. Результаты показали, что на стали 20 участки анодного растворения формируются как на зернах перлита (рис. 7 *а, в*), так и на границах зерен феррита (рис. 7 *б, г*).

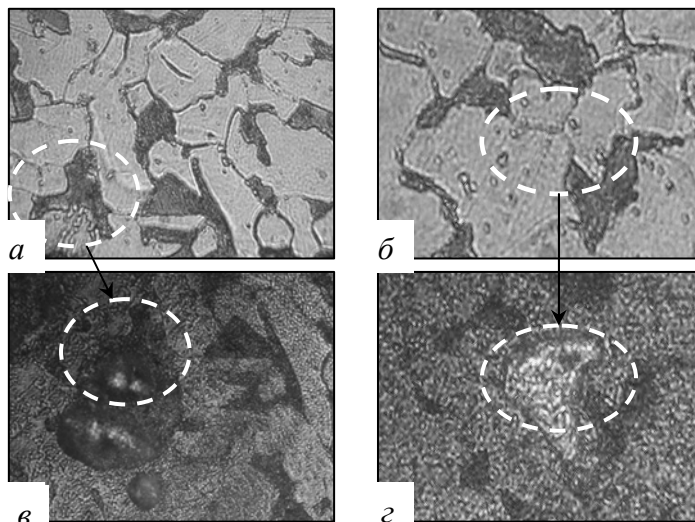


Рис. 7. Поверхность стали 20 после потенциостатического растворения при $\Delta E = 100$ мВ в течение 5 мин, pH 4.2: *а, б* – исходная поверхность после травления в 3% HNO_3 ; *в, г* – те же участки поверхности после поляризации, $\times 650$

Результаты, полученные в гальваностатическом режиме, в котором образец предварительно поляризовали коротким гальваностатическим импульсом (1 мА , 1 с), а затем постоянным значением тока в течение заданного времени (рис. 8), показали, что после импульса на поверхности стали слабо выявляется перлит. То есть исходный импульс инициирует очаги растворения поверхности, развивающиеся при последующей гальваностатической выдержке: первоначально появляются только зерна перлита, четкость которого увеличивается с ростом тока поляризации (рис. 8 *а, б*), а дальнейшее развитие анодного процесса приводит к растворению тела зерна феррита (рис. 8 *б, в*) с его последующей локализацией на межзеренных границах феррит/феррит (рис. 8*г*).

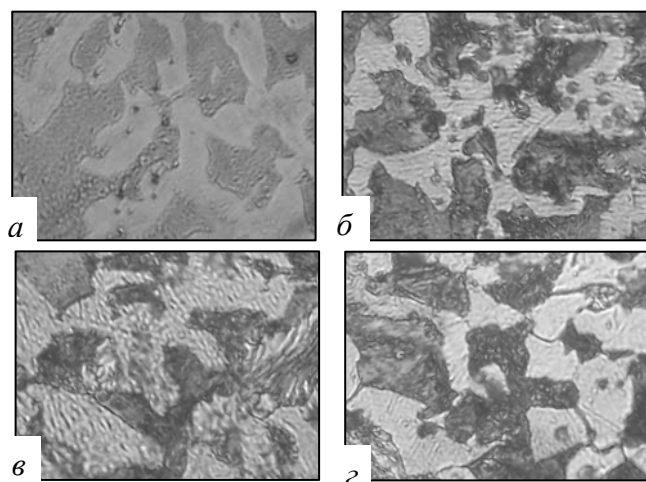


Рис. 8. Поверхность стали 45 после гальваностатической поляризации при токах: 0.05 (*а*), 0.10 (*б*), 0.20 (*в*), 0.40 мА (*г*), $\times 650$, pH 4.2

Растворение армко-железа с микроструктурой феррита можно представить как разрушение межзеренных границ феррит/феррит и тела зерна феррита. Анодное растворение сталей 20, 35, 40 и 45, имеющих феррито-перлитную структуру включает кроме этого рас-

Растворение армко-железа с микроструктурой феррита можно представить как разрушение межзеренных границ феррит/феррит и тела зерна феррита. Анодное растворение сталей 20, 35, 40 и 45, имеющих феррито-перлитную структуру включает кроме этого рас-

творение межфазных границ феррит/цементит и тела зерна структурно-свободного феррита. В случае сталей 60, У8 и У12 со структурой пластинчатого и зернистого перлита рост поляризующего тока сопровождается увеличением четкости перлита, что связано с последовательным растворением границ феррит/цементит и ферритной матрицы перлита.

Анализ состояния поверхности электрода после поляризации позволил оценить интервалы тока, отвечающие растворению границ феррит/цементит и феррит/феррит, тела зерна феррита и перлита, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Значения токов растворения границ феррит/феррит и тела зерна феррита, мА*

рН	Армко-железо	Сталь 20	Сталь 35	Сталь 40	Сталь 45
1.8	0.15 / 0.40	0.30 / 0.20	0.15 / 0.20	0.40 / 0.20	0.30 / 0.40
2.2	0.15 / 0.30	0.30 / 0.20	0.10 / 0.30	0.40 / 0.20	0.30 / 0.40
3.1	0.15 / 0.30	0.25 / 0.25	0.15 / 0.50	0.30 / 0.40	0.15 / 0.40
3.6	0.15 / 0.15	0.15 / 0.15	0.40 / 0.30	0.40 / 0.30	0.10 / 0.10
4.2	0.10 / 0.10	0.05 / 0.10	0.30 / 0.10	0.30 / 0.10	0.30 / 0.10
6.4	0.10 / 0.10	0.10 / 0.20	0.35 / 0.20	0.50 / 0.20	0.40 / 0.20

*В числителе – значения тока растворения границ феррит/феррит, в знаменателе – тела зерна феррита

Для ферритной микроструктуры армко-железа ток, при котором отмечено растворение границ феррит/феррит ($I_{\Phi/\Phi}$), практически не зависит от величины рН (табл. 3) и составляет 0.15 (рН 1.8÷3.6) и 0.10 мА (рН 4.2÷6.4), в то время как для сталей, содержащих цементитную фазу, характерно немонокотное изменение величины $I_{\Phi/\Phi}$ с увеличением ее количества. Результаты исследования позволили выявить в какой последовательности начинают растворяться межзеренные границы феррит/феррит и тело зерна феррита при поляризации (табл. 4). Установлено, что сплавы образуют две группы, в одну из которых входят: армко-железо, стали 35 и 45, где растворение ферритной составляющей начинается с границ зерен, а в другую – стали 20 и 40, где тело зерна феррита растворяется раньше межзеренных границ. Смена растворяющегося элемента структуры происходит при рН около 4, что коррелирует с минимальным значением на $E_{кор} - pH$ – зависимости (рис. 4а).

Таблица 4. Растворяющийся элемент¹ ферритной составляющей микроструктуры и некоторые металлографические характеристики² изученных сплавов

Сплав	рН						D _п , мкм	D _ф , мкм	S _п , %
	1.8	2.2	3.1	3.6	4.2	6.4			
Армко-железо	Ф/Ф	Ф/Ф	Ф/Ф	=	=	=	отс.	44.8	отс.
Сталь 20	ТЗФ	ТЗФ	=	=	Ф/Ф	Ф/Ф	15.3	22.1	22.58
Сталь 35	Ф/Ф	Ф/Ф	Ф/Ф	ТЗФ	ТЗФ	ТЗФ	37.3	34.5	39.36
Сталь 40	ТЗФ	ТЗФ	Ф/Ф	ТЗФ	ТЗФ	ТЗФ	9.2	12.7	48.39
Сталь 45	Ф/Ф	Ф/Ф	Ф/Ф	=	ТЗФ	ТЗФ	17.0	13.2	54.84

¹ Ф/Ф – границы феррит/феррит, ТЗФ – тело зерна феррита, “=” – одновременное выявление границ феррит/феррит и тела зерна

² D_п, D_ф, S_п – диаметр зерна перлита и феррита, площадь занимаемая перлитом

Объяснение полученных закономерностей, следует искать, привлекая количественные характеристики микроструктуры сплавов, которая характеризуется тремя независимыми величинами: диаметр зерна феррита (D_F), диаметр зерна перлита (D_P) и площадь (S_P), занимаемая перлитом (табл. 4). Если величина S_P зависит от содержания углерода в сплаве и монотонно увеличивается с его ростом, то D_F и D_P от его количества не зависят, а определяются режимами термической обработки. Видно, что для сталей 20 и 40, образующих, согласно полученным результатам, одну группу, выполняется неравенство $D_P < D_F$, тогда как для сталей 35 и 45 знак неравенства изменяется на противоположный – $D_P > D_F$, что приводит к соответствующему изменению последовательности растворения «тело зерна – границы феррит/феррит» на обратную.

На полулогарифмических гальваностатических и потенциодинамических вольтамперограммах растворение границ феррит/феррит и тела зерна феррита сопровождается появлением прямолинейных участков, точка пересечения которых как по току, так и по потенциалу с хорошим приближением отвечает завершению процесса растворения одного элемента структуры и началу растворения другого (рис. 9).

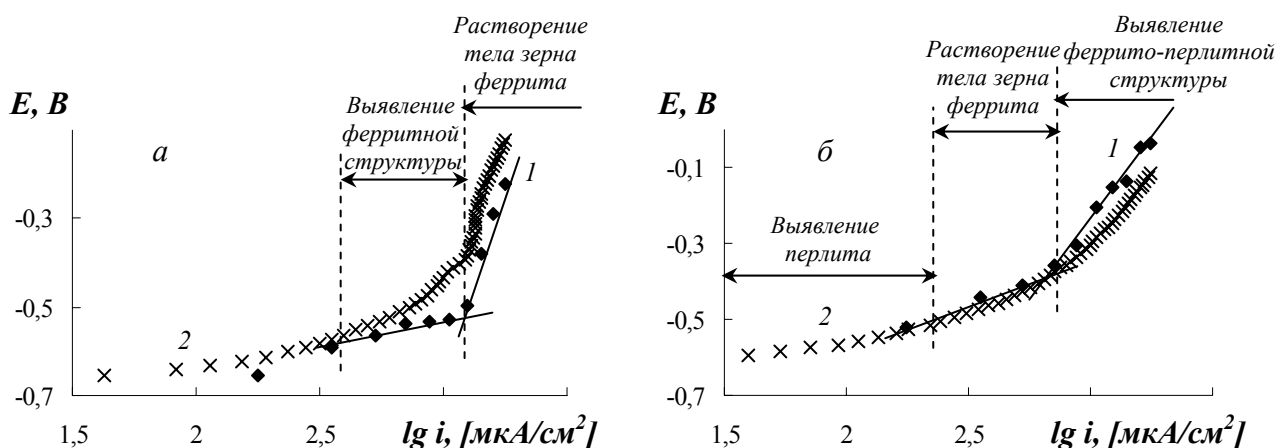


Рис. 9. Полулогарифмические гальваностатическая (1) и потенциодинамическая (2) вольтамперные кривые армко-железа (а) и стали 45 (б), pH 1.8

Разная скорость растворения элементов микроструктуры сплава приводит к формированию рельефа (рис. 10а), а изменение топографии поверхности сопровождается изменением тонального диапазона изображения, т.е. его интегральной яркости, что позволило, используя математическую обработку изображения, представить состояние поверхности в виде спектра яркости (рис. 10б). Так, анодное растворение зерна перлита и феррита (рис. 10а, фото 1 и б) характеризуется спектрами с одним максимумом, положение которого в процессе развития анодного растворения смещается из области яркости феррита в область перлита (рис. 10б). Сравнение спектров яркости стали 45 после гальваностатического растворения в сернокислom растворе со спектрами, полученными после классического растворения в HNO_3 , показало их идентичность. Например, спектр яркости, соответствующий травлению границ феррит/феррит в HNO_3 (рис. 10б, кривая 7) близок по форме к спектру, полученному после анодного растворения границ феррит/феррит (рис. 10б, кривая 4).

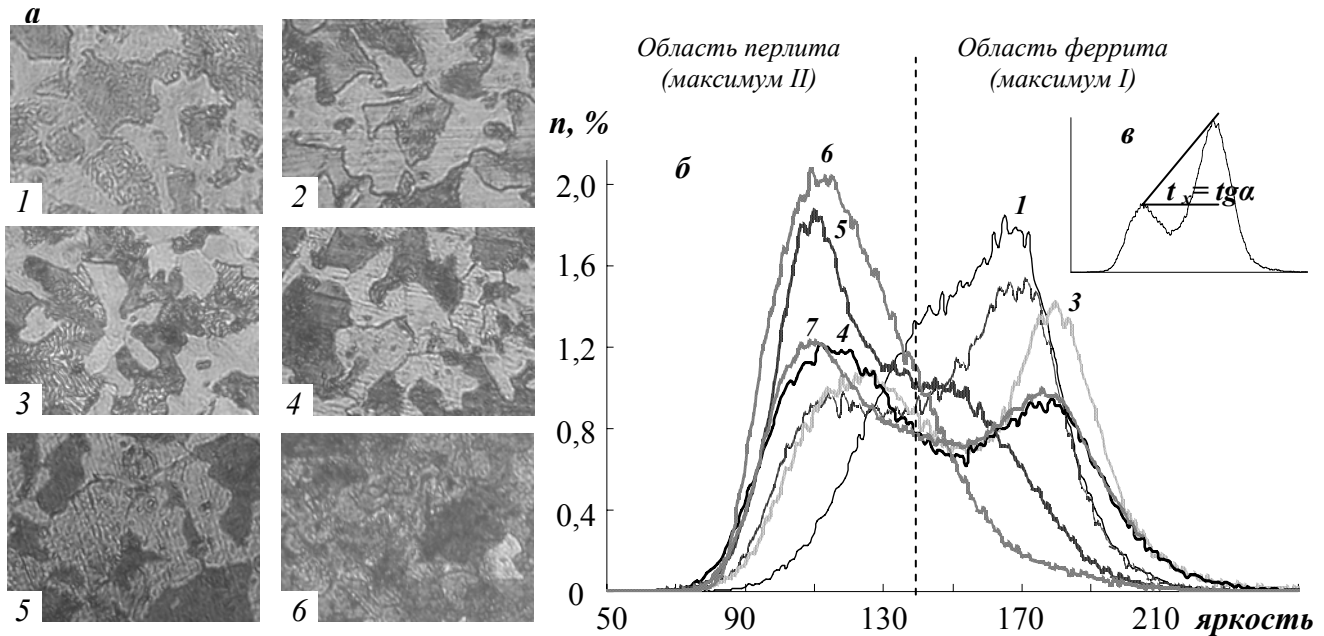


Рис. 10. *а* – Поверхность стали 45 после бестоковой выдержки (1) и гальваностатического растворения под токами: 0.05 (2), 0.15 (3), 0.30 (4), 0.40 (5) и 0.50 мА (6), $\times 650$, pH 1.8.

б – Спектры яркости поверхности стали 45 после анодного растворения (кривые 1÷6) и химического травления в HNO_3 (кривая 7).

в – Схема спектра яркости и определения t_x

Предложена количественная характеристика спектра яркости (t_x), представляющая отношение разности высот максимумов к расстоянию между ними (рис. 10в). На рис. 11 представлены зависимости t_x от тока поляризации и продолжительности травления, которые имеют три области: *I* – растворение перлита ($t_x > -0.0035$), *II* – границ феррит/феррит ($t_x \approx -0.0035$) и *III* – тела зерна феррита ($t_x < -0.0035$). При этом переход к растворению межзеренных границ феррит/феррит и тела зерна феррита происходит в области токов поляризации 0.30 и 0.40 мА, соответственно, что коррелирует с результатами, представленными в табл. 3.

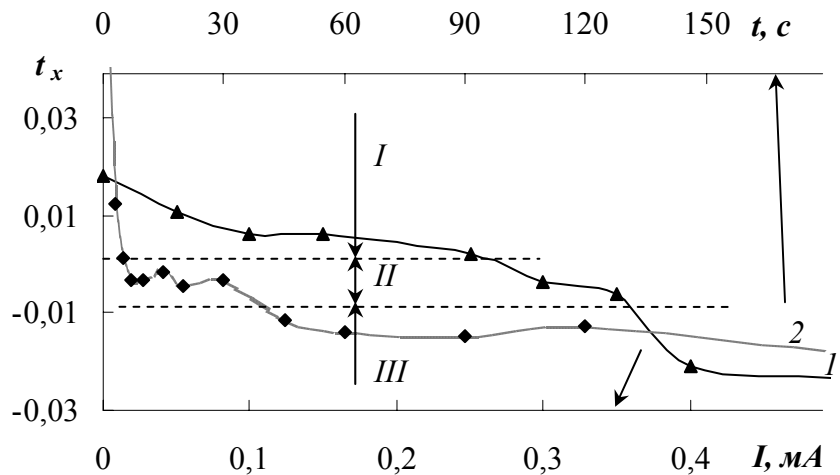


Рис. 11. Зависимости t_x от тока поляризации (1) и продолжительности химического травления (2)

Для определения глубины растворения границ и тела зерна использовали атомно-силовую микроскопию. На рис. 12 представлены АСМ-изображение поверхности стали 45 после гальваностатического растворения и профиль вдоль выбранной секущей, пересекающей зерна перлита (рис. 12а, зерна 1, 3, 5 и 7) и феррита (рис. 12а, зерна 2, 4 и 6). На основании профилей поверхности

(рис. 12б) определяли глубину растворения структурно-свободного феррита ($\Delta h_{\Phi(сmp)}$) и перлита (Δh_{Π}). Поскольку полученные ранее данные свидетельствуют о растворении только фазы феррита, то величина Δh_{Π} соответствует глубине растворения ферритной матрицы перлита ($\Delta h_{\Phi(\Pi)}$). На рис. 13 представлены зависимости $\Delta h_{\Phi(сmp)}$ и $\Delta h_{\Phi(\Pi)}$ от поляризующего анодного тока в сернокислом растворе и продолжительности травления в растворе HNO_3 . Выявлено преобладание скорости растворения структурно-свободного феррита над ферритной матрицей перлита, что коррелирует с результатами расчета их удельных скоростей растворения $i_{\Phi(сmp)}$ и $i_{\Phi(\Pi)}$, полученными методами потенциодинамической вольтамперометрии и изложенными в главе 3. Увеличение глубины растворения структурно-свободного феррита при поляризующем токе более 0.30 мА на $\Delta h_{\Phi(сmp)} - I$ - зависимости (рис. 14, кривая 3) связано с развитием процесса анодного растворения на ферритной составляющей микроструктуры.

При анализе величин $\Delta h_{\Phi(сmp)}$ и $\Delta h_{\Phi(\Pi)}$ были обнаружены точки профиля,

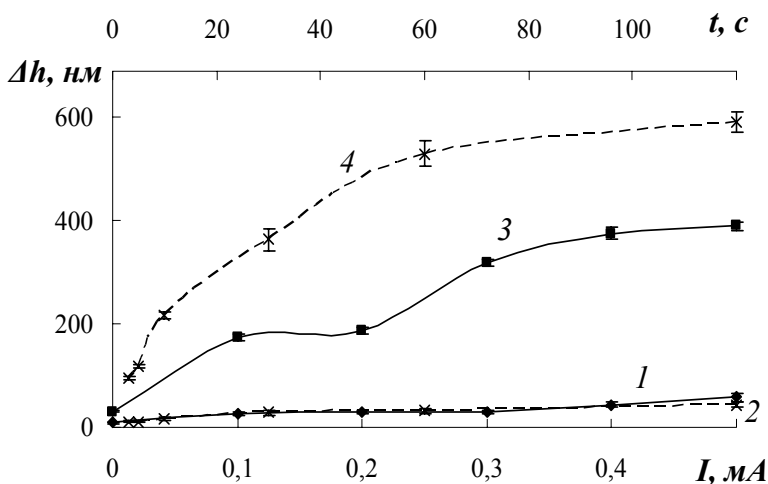


Рис. 13. Зависимости глубины растворения ферритной матрицы перлита (1, 2) и структурно-свободного феррита (3, 4) от тока поляризации (1, 3) в растворе с pH 1.8 и продолжительности травления (2, 4) в HNO_3

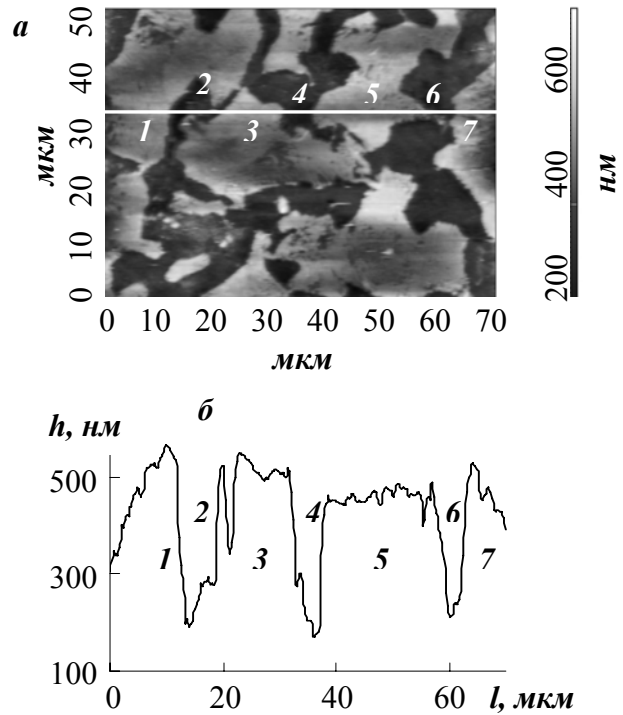


Рис. 12. АСМ-изображение поверхности стали 45 (а) после поляризации током 0.30 мА, pH 1.8 и профиль (б) вдоль секущей; цифры соответствуют номеру пересекаемого зерна

глубина растворения которых превышает глубину растворения тела зерна феррита и перлита в 2 раза. Количество таких точек составляет 6 и 16% от общего количества точек, приходящихся на поверхность зерна структурно-свободного феррита и перлита, соответственно. Привлекая анализ микроструктуры стали 45, можно считать, что указанные точки поверхности соответствуют межзеренным границам феррит/феррит и межфазным границам феррит/цементит в перлите.

Найденное преобладание скорости растворения структурно-свободного феррита над ферритной матрицей перлита, а также межзеренных границ феррит/феррит над межфазными границами феррит/цементит связано с особенностями их кристаллографического строения:

- наличие субзеренной структуры внутри зерна феррита, представляющей собой малоугловые границы, и ее отсутствие в ферритной матрице перлита при размере ферритных слоев, соизмеримых с длиной свободного пробега дислокаций в феррите;
- большой угол разориентировки межзеренных границ феррит/феррит, увеличение которого до $\sim 30^\circ$ приводит к росту энергии границы по сравнению с малоугловыми границами феррит/цементит.

Для изучения влияния дефектности микроструктуры на формирование активных участков растворения использовали армко-железо со структурой феррита в пяти различных состояниях, указанных на рис. 14. Установлено, что прокатка без отжига изменяет последовательность анодного растворения «границы феррит/феррит – тело зерна» на обратную по сравнению с армко-железом после рекристаллизационного отжига. Вольтамперные зависимости армко-железа содержат две четко выраженные области (рис. 14), коррелирующие с токами растворения тела зерна феррита и границ феррит/феррит, найденными по результатам изучения поверхности образца после поляризации. Полученные вольтамперные зависимости образуют две группы, определяемые формой зерна. В первую группу входит армко-железо в состояниях, характеризующихся вытянутыми зернами (рис. 14а), во вторую – в состояниях, характеризующихся равноосными зернами (рис. 14б).

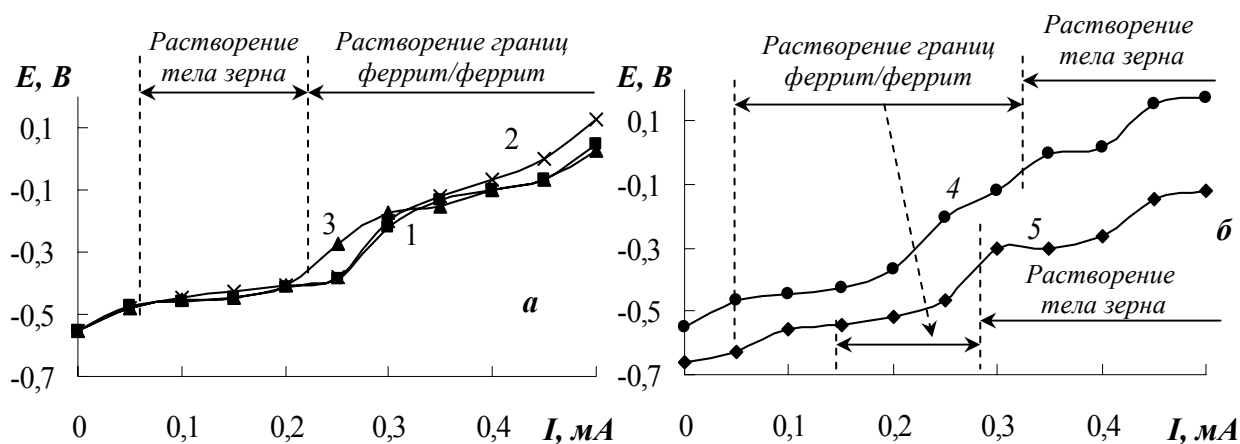


Рис. 14. Вольтамперные зависимости армко-железа (рН 2.2) с вытянутой (а) и равноосной (б) формами зерна в состояниях: 1 – прокатка, 2 – прокатка+отжиг при 450 °С, 3 – прокатка+отжиг при 600 °С в течение 30 с, 4 – прокатка+отжиг при 600 °С в течение 2 мин, 5 – прокатка+отжиг при 650 °С

Очевидно, что причиной изменения последовательности анодного растворения «тело зерна феррита – границы феррит/феррит» является уменьшение плотности дислокаций и появление равноосных зерен в микроструктуре однофазного сплава.

В пятой главе представлены результаты исследования анодного растворения цементитной фазы железоуглеродистых сплавов. Для определения стационарного потенциала цементита ($E_{Ц}$) в изучаемом интервале pH была осуществлена потенциостатическая поляризация при внешнем потенциале в интервале от -0.4 до 0.0 В. Чтобы исключить процесс растворения тела зерна феррита, вносящего дополнительный вклад в величину анодного тока, эксперимент осуществляли на сталях У8 с перлитной микроструктурой не содержащей структурно-свободного феррита. Значения $E_{Ц}$ свидетельствуют, что потенциал цементита положительнее чем армко-железа, и его появление в сталях У8 приводит к смещению потенциала стали в область более положительных значений по сравнению с армко-железом.

Результаты показали, что хроноамперограммы сталей 20, 45, У8 и У12, измеренные в указанном интервале внешнего потенциала, содержат площадку тока с его последующим возрастанием (рис. 15). Изучение состояния поверхности электрода после поляризации показало, что на всех образцах образуется слой черного цвета, который на феррито-перлитных сталях 20 и 45 отмечен избирательно только на поверхности перлита. Это позволило утверждать, что возрастание тока на хроноамперограмме является результатом анодного растворения именно цементита, при котором железо переходит в раствор, а углерод в виде осадка накапливается на поверхности. Площадка тока, предшествующая этому процессу, отвечает селективному растворению феррита, что подтверждается результатами микроскопического исследования поверхности сталей в ходе поляризации.

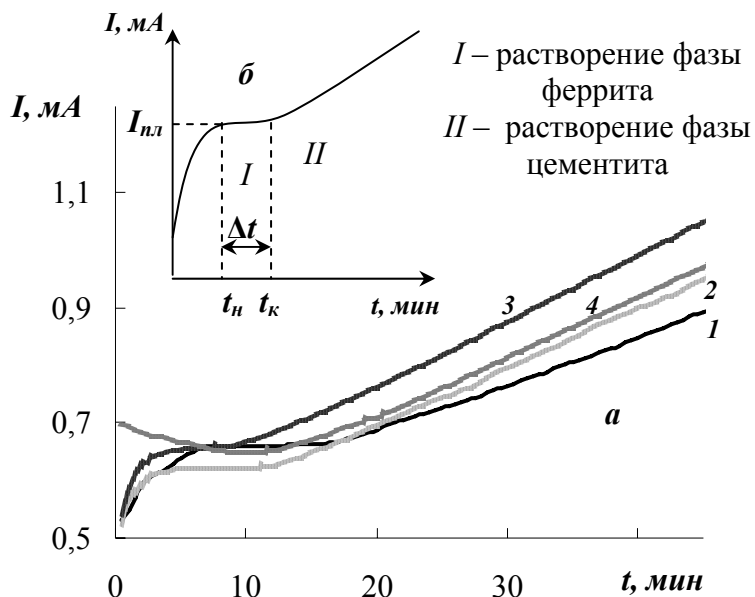


Рис. 15. Хроноамперограммы (а) сталей 20 (1), 45 (2), У8 (3) и У12 (4) при потенциале 0.0 В, pH 4.2 и схема хроноамперограммы (б)

Установлена следующая схема анодного растворения элементов микроструктуры в условиях потенциостатической поляризации с учетом поведения цементита:

- для сталей с микроструктурой «перлит» вначале развивается селективное растворение пластин феррита с появлением площадки тока на хроноамперограмме, а затем осуществляется разрушение цементита;
- для сталей с микроструктурой «феррит+перлит» параллельно с растворением феррита, входящего в состав перлитной составляющей микроструктуры, протекает растворение структурно-свободного феррита.

Использование атомно-силовой микроскопии позволило количественно оценить глубину и скорость растворения элементов микроструктуры сталей 20

и У8. Показано, что поляризация сталей в течение 15 мин приводит к ярко выраженному рельефу с выступающими зернами перлита, что свидетельствует о растворении структурно-свободного феррита, или пластин цементита в результате растворения ферритной матрицы перлита. Увеличение продолжительности поляризации приводит к изменениям исходной микроструктуры:

- на феррито-перлитной микроструктуре наблюдается параллельное растворение структурно-свободного феррита и перлита, на поверхности которого появляются выступающие пластины нерастворенного цементита;
- на перлитной микроструктуре появляются участки с разрушенными пластинами цементита и нарушается периодичность рельефа.

АСМ-исследование рельефа цементитных пластин в ходе их анодного растворения показало, что растворение отдельной цементитной пластины 4 (рис. 16б) сопровождается появлением дополнительных максимумов на соответствующем ей участке профиля. При этом характер профиля не подверженной разрушению пластины 5 (рис. 16б) аналогичен неразрушенным пластинам 1-3 на рис. 16а. Результаты атомно-силовой микроскопии показывают (рис. 16б), что процесс анодного растворения цементита развивается по дефектным плоскостям, расположенным на расстоянии $15 \div 25$ нм.

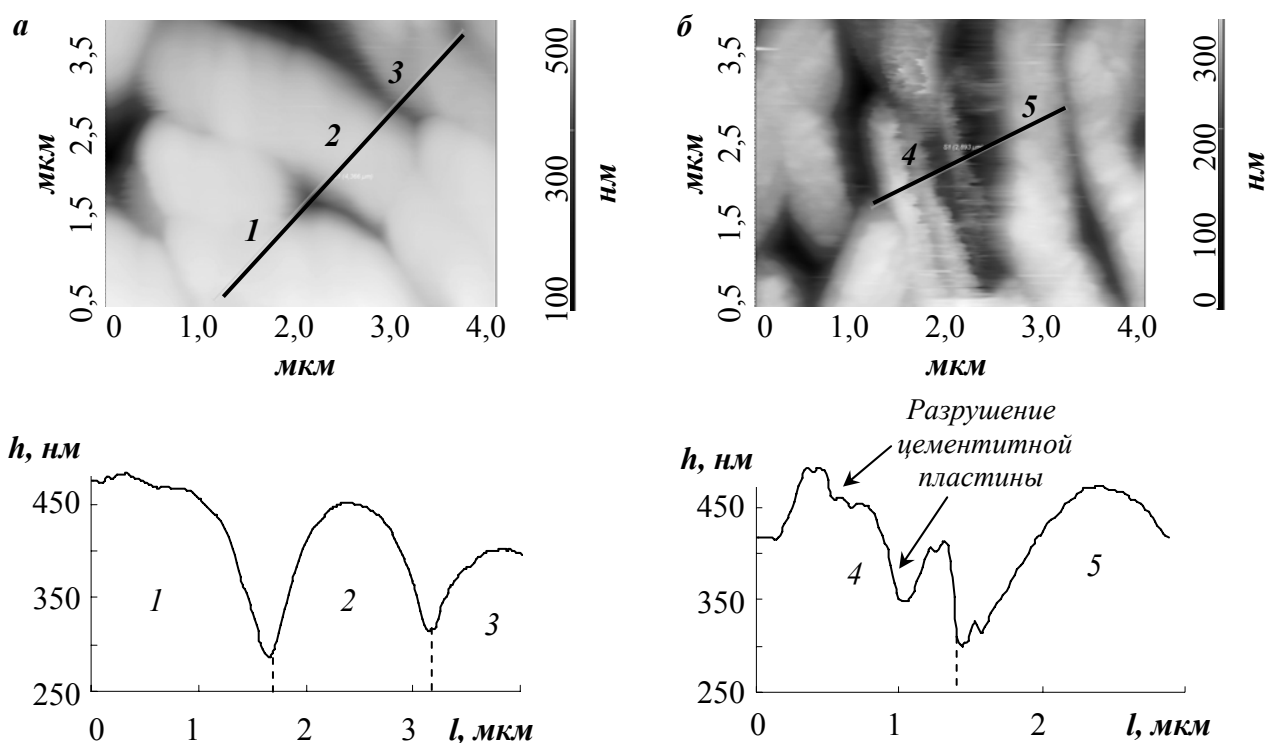


Рис. 16. АСМ-изображения поверхности стали У8 и профиль вдоль указанной линии после потенциостатической поляризации при 0.0 В в течение 15 (а) и 30 мин (б)

Результаты исследования распределения активных участков растворения по элементам микроструктуры, расчета удельных скоростей анодного растворения структурно-свободного феррита и ферритной матрицы перлита, последовательности растворения межфазных, межзеренных границ и тела зерна, а также закономерности растворения пластинчатого цементита, позволяют предложить модель анодного растворения железоуглеродистых сплавов с различными типами микроструктур (рис. 17).

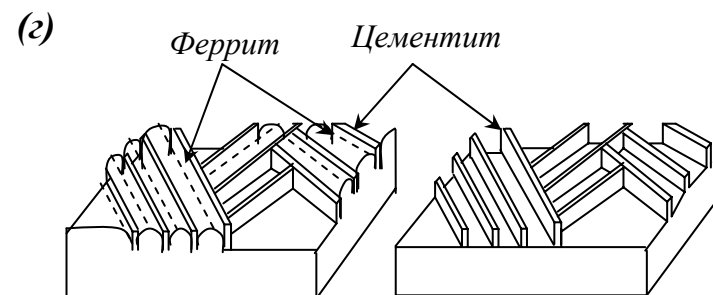
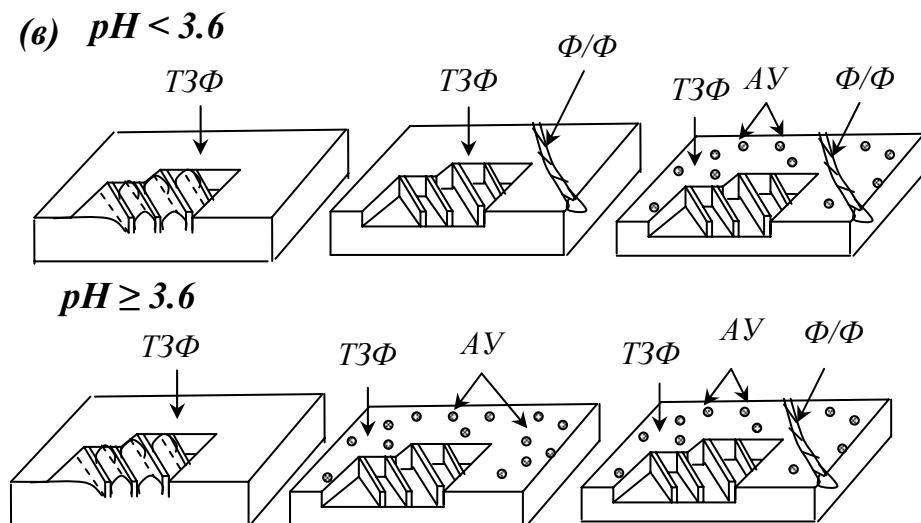
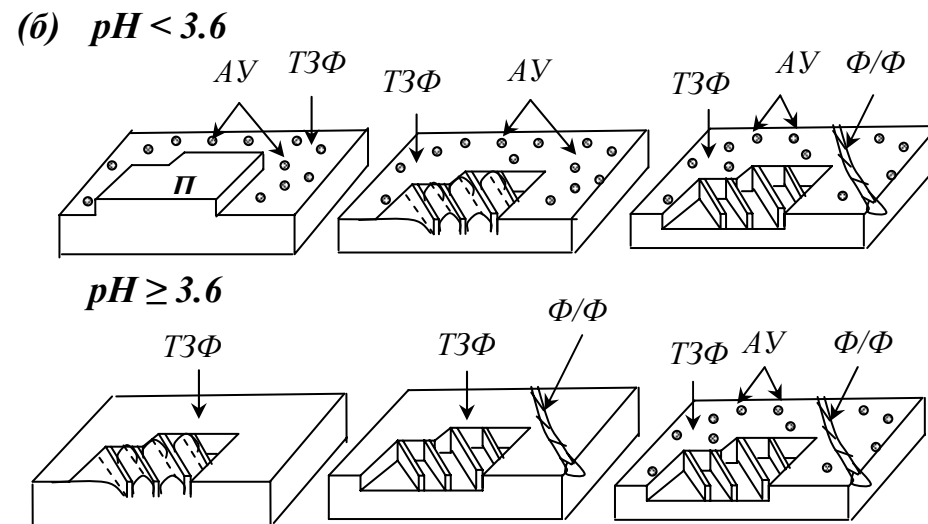
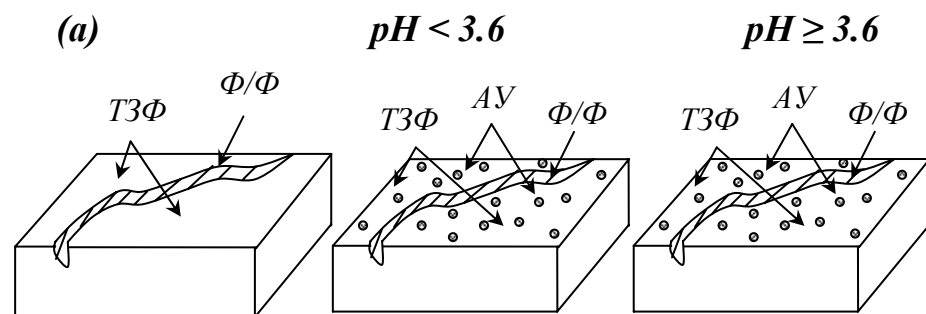


Рис. 17. Модель анодного растворения сталей с микроструктурами различного типа: а – ферритной, б – феррито-перлитной ($D_{\Pi} < D_{\Phi}$), в – феррито-перлитной ($D_{\Pi} > D_{\Phi}$), г – перлитной; АУ – активные участки растворения, Ф/Ф – межзеренные границы феррит/феррит, ТЗФ – тело зерна структурно-свободного феррита, П – перлит

Электрохимическое растворение сплавов с содержанием углерода менее 0.10 масс.% (рис. 17а) и микроструктурой феррита представляет собой разрушение межзеренных границ феррит/феррит и тела зерна феррита. Последовательность растворения указанных элементов микроструктуры при поляризации зависит от величины pH : при $pH < 3.6$ в первую очередь растворяются границы феррит/феррит, а затем – тело зерна, а при $pH \geq 3.6$ растворение межзеренных границ феррит/феррит и тела зерна начинается одновременно.

Распределение участков растворения по поверхности сталей с содержанием углерода 0.10÷0.60 масс.% и феррито-перлитной микроструктурой однозначно определяется соотношением диаметров зерен феррита (D_ϕ) и перлита (D_Π). Если $D_\Pi < D_\phi$, то при $pH < 3.6$ процесс начинается только на поверхности структурно-свободного феррита (рис. 17б), переходя затем на межфазные границы и феррит в перлите. Изменение знака неравенства на противоположный, т.е. $D_\Pi > D_\phi$ приводит к первичной локализации активных участков на поверхности межфазных границ феррит/цементит (рис. 17в). При $pH \geq 3.6$ формирование активных участков растворения происходит только на межфазных границах феррит/цементит независимо от соотношения диаметров D_Π и D_ϕ .

Анодное растворение сталей с содержанием углерода более 0.60 масс.%, имеющих микроструктуру перлита представляет собой последовательное растворение межфазных границ феррит/цементит и ферритной матрицы перлита (рис. 17г).

При значении потенциала, положительнее найденного в работе значения $E_{ц}$, на сплавах, содержащих цементитную составляющую, начинается растворение цементита по дефектным плоскостям в местах выхода дислокаций на поверхность кристалла.

Основные выводы:

1. Рассчитаны удельные скорости процессов анодного растворения ферритной составляющей структуры, а также ферритной матрицы пластинчатого и зернистого перлита железоуглеродистых сплавов с содержанием углерода в интервале 0.017÷1.200 масс.%. Установлено преобладание скорости анодного растворения структурно-свободного феррита над ферритной матрицей перлита, обусловленное формированием ячеистой субструктуры в зернах феррита, а также межзеренных границ над межфазными, связанное с углом разориентировки.

2. Показано, что процесс саморастворения феррито-перлитных и перлитных сталей развивается по межфазной феррито-цементитной границе. Установлена последовательность анодного растворения тела зерна структурно-свободного феррита, межфазных границ феррит/цементит и межзеренных границ феррит/феррит. Показана определяющая роль соотношения диаметров зерен феррита и перлита и строения межфазных и межзеренных границ в формировании этой последовательности.

3. Выявлено, что уменьшение плотности дислокаций и появление равноосных зерен в микроструктуре однофазного сплава со структурой чистого феррита приводит к изменению последовательности анодного растворения «тело

зерна феррита – границы феррит/феррит» на обратную и изменению абсолютных величин потенциала и тока их растворения.

4. Показано, что растворение цементита начинается после растворения фазы феррита в установленной последовательности и проходит по его субграницам.

5. Предложена обобщенная модель анодного растворения сталей с различными типами микроструктур, учитывающая роль межфазных и межзеренных границ и особенности строения ферритной и цементитной фаз.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Салтыков, С.Н. *Анодное растворение ферритной фазы железоуглеродистых феррито-цементитных сплавов с различной формой цементита* [Текст] / С.Н. Салтыков, Н.В. Тарасова // Защита металлов. – 2006. – Т. 42. – №5. – С. 542-547.
2. Тарасова, Н.В. *Особенности формирования очагов электрохимического растворения сплавов с феррито-цементитной структурой в сернокислой среде* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков // Защита металлов. – 2007. – Т. 43. – №3. – С. 252-255.
3. Тарасова, Н.В. *Последовательность электрохимического растворения структурных составляющих железоуглеродистых сплавов в сернокислой среде* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков // Коррозия: материалы, защита. – 2007. – №4. – С. 6-11.
4. Тарасова, Н.В. *Электрохимическое растворение железоуглеродистых сплавов с различными типами структуры при высокой анодной поляризации в сернокислой среде* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков // Коррозия: материалы, защита. – 2007. – №8. – С. 18-22.
5. Тарасова, Н.В. *Развитие представлений о влиянии микро- и наноструктуры железоуглеродистых сплавов на их электрохимическое растворение* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2009. – №1. – С. 97-100.
6. Тарасова, Н.В. *Изучение развития анодного растворения гетерофазного электрода путем анализа изображений поверхности* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков, В.В. Ведищев // Сб. статей Всерос. конф. с Международным участием «Полифункциональные наноматериалы и нанотехнологии». – Томск: ТГУ, 2008. – Т. 2. – С. 174-176.
7. Тарасова, Н.В. *Анодное растворение легированных сталей в сернокислой среде и роль их микроструктуры* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков // Материалы IV Всерос. конф. «Физико-химические процессы в конденсированном состоянии и на межфазных границах ФАГРАН-2008». – Воронеж: ВГУ, 2008. – Т. 1. – С. 246-248.
8. Тарасова, Н.В. *Влияние металлографической структуры железоуглеродистых сплавов на их электрохимическое поведение в сернокислой среде* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков, Е.Л. Торопцева // Экология ЦЧО РФ. – 2004. – №2. – С. 9-14.

9. Тарасова, Н.В. *Электрохимические параметры анодного растворения цементита в сернокислой среде* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков // Сб. тезисов докладов XIII Международной конф. молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2006». – Москва: МГУ, 2006. – Т. 1. – С. 191.
10. Тарасова, Н.В. *Влияние межфазных и межзеренных границ в микроструктуре сталей на их электрохимическое растворение* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков // Материалы VIII Международной конф. «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии». – Кисловодск–Ставрополь: СевКавГТУ, 2008. – С. 413-415.
11. Тарасова, Н.В. *Развитие метода анодного травления для анализа поверхности сталей* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков // Рефераты докладов II Международного Форума «Аналитика и аналитики». – Воронеж: ВГТА, 2008. – Т.1. – С. 118.
12. Тарасова, Н.В. *Активные центры анодного растворения феррито-цементитного сплава в сернокислой среде* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков // Сб. тезисов докладов XVI Всерос. конф. «Проблемы теоретической и экспериментальной химии». – Екатеринбург: УрГУ, 2006. – С. 147-148.
13. Тарасова, Н.В. *Влияние формы ферритного зерна на анодное поведение железа в сернокислой среде* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков // Межвуз. сборник научных трудов VI Всерос. конф. молодых ученых с межд. участием «Современные проблемы теоретической и экспериментальной химии». – Саратов: Изд-во Научная книга. 2007. – С. 320-322.
14. Тарасова, Н.В. *Использование электрохимических методов в изучении роли микроструктуры сталей в их активном растворении* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков // Материалы VII Всерос. конф. по электрохимическим методам анализа с международным участием «ЭМА-2008». – Уфа, 2008. – С. 110.
15. Тарасова, Н.В. *Некоторые аспекты взаимосвязи строения сплавов системы «Fe-C» с их анодным поведением в кислых средах* [Текст] / Н.В. Тарасова, С.Н. Салтыков // Материалы Всерос. конф. «Электрохимия и экология». – Новочеркасск: ЮРГУ (НПИ), 2008. – С. 15.