

**ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ПОЛИРОВАНИЕ
СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА,
ХРОМА И НИКЕЛЯ**

**Минск
БНТУ
2014**

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ПОЛИРОВАНИЕ
СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА,
ХРОМА И НИКЕЛЯ

Минск
БНТУ
2014

Авторы:

*Ю. В. Синькевич, В. К. Шелег, И. Н. Янковский
Г. Я. Беляев*

Электроимпульсное полирование на основе железа, хрома и никеля / Ю. В. Синькевич [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – 325 с. – ISBN 978-985-550-516-2.

Монография посвящена современным проблемам обеспечения качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей машин в условиях электроимпульсного полирования. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований физико-химических процессов, протекающих на обрабатываемой поверхности и в парогазовой оболочке, механизмов и основных закономерностей электрической проводимости парогазовой оболочки, анодного растворения компонентов сплавов, сглаживания шероховатости поверхности и формирования топографии.

Рассмотрено влияние технологических режимов электроимпульсного полирования на точность и производительность обработки, качество, механические свойства и эксплуатационные характеристики поверхности деталей.

Для научных работников, инженеров-технологов, специализирующихся в области финишных методов обработки, и может быть полезна аспирантам, магистрантам и студентам машиностроительных специальностей.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Белорусского национального технического университета
(протокол № 5 от 6 июня 2014 г.)

Рецензенты:

заместитель директора по научной работе ГНУ «Физико-технический
Институт НАН Беларуси», член-корреспондент НАН Беларуси,
доктор технических наук, профессор *А. П. Ласковнѣв*;
заведующий НИИЛ плазменных и лазерных технологий БНТУ,
доктор технических наук, профессор *О. Г. Девойно*;
профессор кафедры «Технология металлов» УО «Белорусский
государственный аграрный технический университет», доктор
технических наук, профессор *Л. М. Акулович*

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, ХРОМА И НИКЕЛЯ.....	10
1.1. Анализ методов финишной обработки поверхности заготовок из сплавов на основе железа, хрома и никеля.....	10
1.1.1. Механические методы отделочно-зачистной обработки.....	10
1.1.2. Механизмы и основные закономерности химического и электрохимического полирования.....	15
1.1.2.1. Химическое полирование.....	16
1.1.2.2. Электрохимическое полирование.....	22
1.2 Основные закономерности разрядных процессов в парогазовой оболочке при электролитной анодной обработке.....	30
1.2.1. Анодные эффекты в водных электролитах и их технологическое применение.....	31
1.2.2. Современные представления о механизме электрической проводимости парогазовой оболочки в условиях электролитной анодной обработки.....	38
1.3. Электроимпульсное полирование заготовок из сплавов на основе железа, хрома и никеля.....	48
1.3.1. Факторы, влияющие на стабильность процесса электроимпульсного полирования, производительность, точность обработки, качество и эксплуатационные характеристики поверхности деталей.....	48
1.3.2. Современные представления о механизме формирования профиля поверхности в условиях электроимпульсного полирования.....	57
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	61
2.1. Оборудование и технологическая оснастка для исследования процесса электроимпульсного полирования.....	61
2.2. Выбор объектов для исследования.....	63
2.3. Методы исследования.....	66
2.3.1. Методика исследования самоорганизованных	

гидродинамических потоков в электролите.....	67
2.3.2. Методика исследования амплитудных, частотных и спектральных характеристик электрического тока в парогазовой оболочке при анодном процессе.....	68
2.3.3. Методика измерения толщины парогазовой оболочки.....	69
2.3.4. Методики определения рассеивающей способности электролита, выхода металла по току, точности и производительности обработки.....	71
2.3.5. Методики исследования геометрических параметров качества и блеска поверхности.....	80
2.3.6. Вероятностно-статистический метод исследования механизма формирования профиля поверхности в процессе электроимпульсного полирования.....	83
2.3.7. Методики исследования морфологии, микроструктуры, химического и фазового состава поверхности.....	90
2.3.8. Методика определения твердости тонкого поверхностного слоя.....	93
2.3.9. Методики исследования коррозионной стойкости и склонности к межкристаллитной коррозии.....	94
2.3.10. Методика определения адгезионной прочности гальванических и тонкопленочных вакуумно-плазменных покрытий.....	98
2.3.11. Методика определения коэффициента трения...	100
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ.....	103
3.1. Основные закономерности электрической проводимости парогазовой оболочки в условиях электроимпульсного полирования.....	103
3.1.1. Исследование стабильности анодного процесса в режиме электроимпульсного полирования.....	103
3.1.2. Исследование равномерности распределения электрического тока на поверхности анода в условиях электроимпульсного полирования.....	107
3.1.3. Исследование амплитудных, частотных и спектральных характеристик электрического тока, протекающего через парогазовую оболочку при анодном процессе.....	115

3.1.3.1. Осциллографические исследования электрического тока.....	116
3.1.3.2. Исследование спектральных характеристик электрического тока.....	125
3.2. Основные закономерности механизма съема металла при электроимпульсном полировании сплавов на основе железа, хрома и никеля.....	132
3.2.1. Исследование выхода металла по току в условиях электроимпульсного полирования.....	134
3.2.2. Влияние электроимпульсного полирования на микроструктуру и фазовый состав поверхности коррозионноустойчивых сталей.....	139
3.2.3. Влияние электроимпульсного полирования на химический состав сверхтонкого поверхностного слоя коррозионноустойчивых сталей.....	144
3.2.4. Влияние электроимпульсного полирования на морфологию и химический состав поверхности низколегированных углеродистых и коррозионноустойчивых сталей.....	147
4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, ХРОМА И НИКЕЛЯ.....	168
4.1. Физико-математическая модель самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите в условиях электроимпульсного полирования.....	168
4.1.1. Физическая модель самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите.....	168
4.1.2. Математическое моделирование самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите.....	170
4.2. Физико-математическая модель парогазовой оболочки.....	180
4.2.1. Оценка адекватности математической модели парогазовой оболочки.....	188
4.3. Концептуальная модель коммутационного механизма электрической проводимости парогазовой оболочки в условиях электроимпульсного полирования.....	191
4.4. Анодные процессы и механизмы анодного растворения низколегированных углеродистых и коррозионноустойчивых сталей в условиях электроимпульсного полирования.....	200

4.5. Основы выбора состава раствора электролита для электроимпульсного полирования металлов и сплавов.....	215
5. МЕХАНИЗМ И ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ПОЛИРОВАНИИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, ХРОМА И НИКЕЛЯ.....	219
5.1. Механизм и основные технологические закономерности формирования профиля поверхности в условиях электроимпульсного полирования.....	219
5.1.1. Исследование влияния режимов обработки на параметры шероховатости поверхности, связанные с высотными свойствами неровностей профиля.....	222
5.1.2. Математическое моделирование параметров шероховатости поверхности Ra, Rz и Rmax при электроимпульсном полировании низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей.....	231
5.1.3. Исследование влияния режимов обработки на параметры шероховатости поверхности, связанные с формой неровностей и их свойствами в направлении длины профиля.....	238
5.1.4. Вероятностно-статистическая оценка профиля поверхности, сформированного в условиях электроимпульсного полирования.....	246
5.2. Геометрическая модель формирования профиля поверхности.....	251
5.3. Влияние электроимпульсного полирования на блеск поверхности низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей.....	255
5.4. Влияние электроимпульсного полирования на твердость поверхности низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей.....	258
6. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, ХРОМА И НИКЕЛЯ.....	261
6.1. Коррозионная стойкость низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей.....	261

6.2. Стойкость коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т против межкристаллитной коррозии.....	265
6.3. Коэффициент трения.....	268
6.4. Электромагнитные характеристики разрезных витых ленточных магнитопроводов трансформаторов.....	271
6.5. Адгезионная прочность и качество вакуумно-плазменных покрытий.....	272
6.6. Адгезионная прочность и качество гальванических покрытий.....	277
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	281
ЛИТЕРАТУРА.....	284

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного уровня развития машиностроения одной из основных проблем, решаемых на этапе изготовления деталей различного назначения, является обеспечение стабильно высокого качества обрабатываемых поверхностей. Качество, надежность и долговечность изделий существенно зависят от степени совершенства применяемых при их производстве технологий финишной обработки, формирующих качество поверхности. Из отечественного и зарубежного опыта известно, что трудоемкость финишных операций в общей трудоемкости изготовления деталей может превышать 20 %. Сложность и многообразие форм обрабатываемых поверхностей затрудняют создание универсальных способов финишной обработки. В отечественной и мировой практике при выполнении отделочно-зачистной обработки применяется широкий арсенал методов механической и физико-технической обработки: методы обработки лезвийными инструментами, связанным и свободным абразивами, методы поверхностного пластического деформирования, электрохимические методы, в том числе химическое (ХП) и электрохимическое (ЭХП) полирование, а также комбинированные методы, в частности, методы, основанные на сочетании механического воздействия абразивного материала с химическим или электрохимическим воздействием рабочего раствора. Однако известные методы финишной обработки, позволяющие обеспечить шероховатость поверхности в широком диапазоне значений (от Ra 1,60 мкм до Ra 0,012 мкм), имеют ряд таких существенных недостатков, как многостадийность и большая трудоемкость обработки при повышенных требованиях к качеству поверхности, затруднительность обработки изделий сложной конфигурации при высоких требованиях к точности, формирование в процессе обработки дефектного поверхностного слоя, негативное влияние на физико-механические свойства поверхности и другие.

Одним из перспективных методов финишной обработки поверхности металлических изделий является электроимпульсное полирование (ЭИП), отличающееся от других электрохимических методов обработки стабильностью процесса, высоким качеством, производительностью и низкой себестоимостью обработки, возможностью полной автоматизации процесса и экологической безопасностью. В

настоящее время ЭИП применяется для финишной обработки преимущественно наружных поверхностей изделий различного назначения, обеспечивая снижение шероховатости до уровня $Ra\ 0,32-0,06$ мкм, для удаления заусенцев и округления острых кромок, подготовки поверхности изделий под нанесение гальванических и вакуумно-плазменных покрытий, удаления оксидных пленок, окалины небольшой толщины и дефектных вакуумно-плазменных покрытий, а также для очистки поверхности деталей от минеральных и органических загрязнений.

В последнее время вопросам, связанным с исследованием и внедрением в производство метода ЭИП, уделяется большое внимание в Беларуси, Болгарии, Германии, Китае, Нидерландах, России, Словакии, США, Украине и других странах. Вместе с тем, несмотря на значительный объем исследований физико-химических и технологических аспектов процесса ЭИП, проведенных учеными разных школ, и большое количество научных публикаций и патентов, широкое внедрение метода в промышленных масштабах для финишной обработки изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля сдерживается из-за отсутствия высокоэффективных технологий и серийного промышленного технологического оборудования. Это связано с недостаточной изученностью физико-химических процессов, протекающих на обрабатываемой поверхности и в парогазовой оболочке (ПГО), механизмов и основных закономерностей электрической проводимости ПГО, съема металла, сглаживания шероховатости поверхности и формирования топографии, влияния технологических режимов ЭИП на точность и производительность обработки, качество, механические свойства и эксплуатационные характеристики поверхности деталей.

Разработке научной базы для решения важной народнохозяйственной проблемы создания высокоэффективных технологических процессов ЭИП и современного технологического оборудования, обеспечивающих формирование поверхности деталей с заданным комплексом механических свойств, точности, геометрических параметров качества и эксплуатационных характеристик, и концептуальному развитию научного направления в области высокоэффективных электрофизических методов финишной обработки с использованием высокоэнергетического воздействия на обрабатываемую поверхность посвящена настоящая работа.

1. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, ХРОМА И НИКЕЛЯ

1.1. Анализ методов финишной обработки поверхности заготовок из сплавов на основе железа, хрома и никеля

1.1.1. Механические методы отделочно-зачистной обработки

Трудоемкость операций механической финишной обработки в общем объеме защитно-декоративной отделки изделий достигает 60–70 % [1]. Механические методы полирования поверхности, удаления заусенцев и отделки кромок получили наибольшее распространение как в отечественной, так и в мировой практике. При этом, несмотря на интенсивные поиски путей совершенствования и создания новых высокопроизводительных методов, объем работ, выполняемых с помощью ручного инструмента, остается относительно большим. По данным [2] 88 % предприятий для этих целей используют ручной инструмент.

Многочисленные методы механической финишной обработки поверхности деталей могут быть объединены в четыре основные группы: обработка лезвийными инструментами, связанным и свободным абразивами, а также методы, основанные на пластическом деформировании поверхностного слоя. На отечественных и зарубежных предприятиях для механической финишной обработки и для подготовки поверхности заготовок из сплавов на основе железа, хрома и никеля перед осаждением функциональных покрытий наиболее широко применяют шлифование абразивными и лепестковыми кругами, лентами и полимерно-абразивными щетками, шлифование в барабанных и вибрационных установках, струйную абразивную и гидроабразивную обработку, крацевание, виброобкатку, полирование лепестковыми кругами, кругами и лентами с полировочными пастами, полимерно-абразивными щетками, полирование в барабанных и вибрационных установках и магнитно-абразивную обработку.

Шлифование эластичными абразивными кругами и лентами позволяет достичь шероховатости поверхности $Ra\ 1,60\text{--}0,02\ \mu\text{м}$, а последующее полирование с применением паст – $Ra\ 0,05\text{--}0,012\ \mu\text{м}$

[1, 3–5]. Точность размеров при ленточном шлифовании цилиндрических поверхностей обеспечивается до 0,01 мм, плоскостей до 0,04 мм, фасонных поверхностей до 0,05–0,07 мм [5]. Круги изготавливают из фетра, войлока, бязи, сукна, парусины, кожи, фибры и синтетических материалов [6, 7]. В качестве абразивного материала используется корунд, карбид кремния, цирконкорунд [7]. При полировании применяют различные пасты. Наиболее универсальными, эффективными и недорогими пастами являются жировая, маршалитовая, крокусная, известковая и хромовая [8]. Расход пасты типа ГОИ при полировании 1 м² составляет 100–120 г [9] при относительно невысоком съеме металла 0,07–0,40 мг/см²·мин [10]. Однако применение паст на операциях полирования усложняет последующее обезжиривание деталей, которое часто возможно только во вредных органических растворителях. При шлифовании происходит царапание поверхностного слоя заготовки со снятием особо тонких стружек. В связи с этим шероховатость шлифованной поверхности зависит главным образом от режима шлифования, определяющего нагрузку на абразивное зерно, а также от физико-механических и химических свойств обрабатываемого материала и абразивных зерен [11]. На поверхности детали образуется тонкий слой пластически деформированного металла с растягивающими остаточными напряжениями. При неправильном выборе режимов обработки и характеристик шлифовального круга возможно быстрое засаливание круга и появление прижогов на обработанной поверхности [5, 12]. Кроме того, при шлифовании и полировании высока вероятность шаржирования обрабатываемой поверхности частицами абразива. Шлифование и полирование с помощью кругов и лент трудоемко и зачастую невозможно без использования ручного труда.

Обработка лепестковыми кругами обеспечивает достижение шероховатости поверхности Ra 0,63–0,02 мкм [7, 13]. В зависимости от режимов обработки в поверхностном слое возможно формирование как растягивающих, так и сжимающих остаточных напряжений при незначительной степени упрочнения [14]. Недостатками метода являются ограниченная применимость при обработке заготовок сложной конфигурации, низкая производительность и незначительная величина снимаемого припуска (0,02–0,05 мм).

Технология отделочно-зачистной обработки эластичными щетками на основе полимерно-абразивных волоконных композитов

позволяет осуществлять операции полирования, снятия заусенцев, округления острых кромок, очистки поверхности от окалины, продуктов коррозии, оксидных пленок, лакокрасочных покрытий и подготовки поверхности под сварку и склеивание [15, 16]. В зоне скольжения абразивных волокон щетки по обрабатываемой поверхности механизм работы полимерно-абразивной щетки аналогичен механизму работы абразивного круга. Каждое зерно, закрепленное в эластичном волокне, осуществляет абразивное воздействие на поверхность заготовки. Эффективность и качество обработки определяются силовым воздействием абразивных зерен и зависят от конструктивных особенностей инструмента, абразивных частиц, химического состава, физико-механических свойств полимерной связки, режимов обработки и площади контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью [16–18]. Метод обладает универсальностью и достаточно широкими технологическими возможностями, однако, имеет характерные недостатки – ограниченную применимость при обработке заготовок сложной конфигурации, низкую производительность и незначительную величину снимаемого припуска.

Существенно менее трудоемкой является обработка заготовок в барабанных установках, куда они загружаются насыпью в большом количестве. Такой обработке подвергаются детали, не имеющие, как правило, жестких допусков. При обработке в зависимости от рабочей среды шероховатость поверхности может быть снижена с $Ra\ 1,60\text{--}0,80$ мкм до $Ra\ 0,40\text{--}0,20$ мкм [1]. В качестве рабочей среды при шлифовании применяют бой шлифовальных кругов, специальные абразивные керамические материалы пирамидальной формы (чипы) с добавлением корунда или карбида кремния, а также бой гранита, базальта, фарфора и другие. При полировании используют металлические и фарфоровые шарики и цилиндрики, пирамидальные пластиковые чипы, обрезки кожи, фетра, войлока, резины, кукурузные початки, древесные опилки и другие [6, 19]. Этот метод обработки характеризуется высоким уровнем шума и достаточно большой продолжительностью обработки – от 2–4 часов до нескольких дней. Повышение эффективности обработки в барабанах достигается путем замены вращательного движения барабана вокруг одной оси на планетарное вращение или на колебательные движения виброконтейнера. Производительность таких установок выше в 7–10 раз по сравнению с обычными барабанными установ-

ками [8, 19]. Оптимизация геометрических размеров виброконтейнера в сочетании с дополнительными конструктивными элементами и оптимальной амплитудой колебаний позволяет дополнительно повысить производительность и качество обработки [2].

Дополнительного повышения интенсивности обработки поверхности деталей в контейнерных и барабанных установках можно достичь путем сочетания механического воздействия абразивного материала с химическим или электрохимическим воздействием рабочего раствора [1, 2, 6, 19]. Кислая среда способствует разрыхлению и отделению от поверхности металла слоя оксидов, а щелочная среда смягчает режущее действие абразивов и облегчает удаление загрязнений. Добавки поверхностно-активных веществ и ингибиторов коррозии повышают производительность и качество обработки. Существует большое количество составов растворов, обладающих специальными свойствами [2, 8, 19]. Для расширения технологических возможностей метода применяют наложение ультразвуковых колебаний в процессе обработки [20, 21].

Струйно-абразивные методы обработки поверхности заготовок нашли широкое применение для решения разнообразных задач: удаления окалины и ржавчины, снятия заусенцев, зачистки швов после сварки и пайки, снижения шероховатости и матирования поверхности деталей, изготовленных из металлов, пластмасс и стекла, получения рисунков и надписей на любых материалах с применением шаблонов, сатинирования и других [6, 8, 19]. Методы обеспечивают высокую производительность и экономичность обработки. Абразивным материалом служит кварцевый или металлический песок, стальная дробь, корунд, стеклянный порошок определенной формы, фруктовые косточки [1]. Струйно-абразивные методы имеют большое многообразие и подразделяются на абразивно-жидкостной, абразивно-центробежный, абразивно-пневматический, абразивно-электрический, абразивно-гравитационный, а также на комбинированные струйно-абразивные методы – абразивно-пневможидкостной, абразивно-жидкостно-центробежный и другие [22]. К недостаткам струйно-абразивных методов относится необходимость проведения обработки в специальных герметичных установках, предотвращающих попадание вредной абразивной пыли в производственное помещение, а также невысокий ресурс работы оборудования при использовании суспензий, в которых абразив

находится в жидкой среде во взвешенном состоянии, и высокий уровень шума. Кроме того, струйная абразивная обработка непригодна в тех случаях, когда требуется обеспечить высокую отражательную способность (блеск) обработанной поверхности изделия.

Одним из методов механической финишной обработки поверхности является магнитно-абразивная обработка, позволяющая решать различные технологические задачи. С помощью этого метода можно проводить отделочную и упрочняющую обработку различных по форме поверхностей, удалять заусенцы, округлять кромки, доводить режущие кромки инструментов с минимальным радиусом до 3–5 мкм, удалять химические пленки, окалину и другие [23–28]. Сущность магнитно-абразивной обработки заключается в удалении припуска преимущественно абразивным способом с созданием магнитного поля непосредственно в зоне резания. Снижение шероховатости поверхности заготовки из закаленной стали с Ra 0,3–0,6 мкм до Ra 0,04–0,08 мкм сопровождается удалением припуска 4–5 мкм. При этом погрешность диаметральных размеров может составлять ± 1 –1,5 мкм [25]. Магнитно-абразивная обработка характеризуется многообразием кинематических схем, выбор которых зависит от формы и размера обрабатываемых заготовок. После обработки поверхностный слой обладает повышенной микротвердостью, износо- и коррозионной стойкостью и в нем формируются сжимающие остаточные напряжения [23, 24]. К недостаткам метода относятся его ограниченная универсальность, большая вероятность шаржирования поверхности и существенное влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала на результаты обработки.

Крацевание с помощью проволочных или волосяных щеток применяется для очистки поверхности от различных загрязнений, для снятия заусенцев, а также для сглаживания шероховатости поверхности. При крацевании происходит субмикрорезание в зоне контакта проволочной щетки с поверхностью заготовки, обеспечивающее снижение шероховатости поверхности до Ra 1,5–0,3 мкм [10, 29]. При определенных условиях обработки щетками можно обеспечить высокое качество отделки поверхности (Ra 0,16–0,063 мкм) [8]. К недостаткам метода следует отнести низкую режущую способность щеток и малую величину снимаемого припуска (до 0,02 мм), а также повышенную волнистость обработанной поверхности. Использование металлических щеток с плотной набивкой позволяет бес-

печить шероховатость поверхности $Ra\ 2,6-0,26$ мкм при съеме металла с поверхности 0,01–0,1 мм [13, 30–33]. Этот метод обработки называется иглофрезерованием и позволяет одновременно с зачисткой поверхности обеспечить ее отделку и упрочнение. Недостатком метода является невысокая точность обработки и ограниченная применимость при обработке заготовок сложной конфигурации.

Метод вибрационного обкатывания основан на пластическом деформировании поверхностных слоев металла шариком или алмазным наконечником, вдавливаемым в обрабатываемую поверхность и совершающим сложное движение относительно этой поверхности. В результате обработки образуется характерный микро-рельеф [31]. При отсутствии сложного дополнительного движения инструмента относительно обрабатываемой поверхности метод обработки называется поверхностным пластическим деформированием [31]. Метод виброобкатывания применяется для обработки плоских и сложнопрофильных поверхностей деталей из различных металлов и сплавов и позволяет одновременно с декоративной отделкой поверхности произвести ее упрочнение. Однако метод обладает невысокой производительностью обработки и имеет ограничения по форме и размерам обрабатываемых поверхностей [13].

Таким образом, на выбор метода механической отделочно-зачистной обработки поверхности заготовок из сплавов на основе железа, хрома и никеля оказывают влияние многочисленные факторы, в частности, конфигурация детали, требования к качеству поверхности, точности и производительности обработки, физико-механические свойства поверхности, величина припуска, возможное негативное влияние обработки на формирование дефектного поверхностного слоя и другие.

1.1.2. Механизмы и основные закономерности химического и электрохимического полирования

В современном машиностроительном производстве большое внимание уделяется новым высокоэффективным методам финишной обработки, обеспечивающим наряду со снижением трудоемкости изготовления деталей повышение качества и эксплуатационных характеристик поверхности. Широкое применение коррозионно-стойких, жаропрочных, магнитных и других высоколегированных

сталей и сплавов, обработка которых механическими методами затруднена или невозможна, вызывает необходимость использования в технологических процессах изготовления деталей электрофизических и электрохимических методов обработки. К электрохимическим методам финишной обработки, основанным на анодном растворении поверхности заготовки, относятся ХП и ЭХП [34–36]. Учитывая научную и практическую значимость и недостаточную изученность механизма съема металла в условиях ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля и общую электрохимическую природу процессов ХП, ЭХП и ЭИП, проведем анализ гипотез о механизмах съема металла в условиях ХП и ЭХП.

1.1.2.1. Химическое полирование

В зависимости от поставленных задач и толщины снимаемого при ХП слоя металла различают [34]:

- глянецвание – придание блеска поверхности с выравниванием субнеровностей при толщине снимаемого слоя менее 1 мкм;
- полирование – сглаживание неровностей при толщине снимаемого слоя от 1 до 10 мкм;
- шлифование (химический ремонт), при котором толщина снимаемого слоя металла составляет от 10 до 200 мкм и выше с одновременным сглаживанием неровностей поверхности.

К основным преимуществам ХП относятся [6, 8, 34, 35]:

- производительность ХП в отличие от методов обработки резанием не зависит от физико-механических свойств металла и конфигурации заготовки, причем в ряде случаев она выше, чем у механических методов обработки;
- на поверхности после ХП вследствие особенностей рельефа меньше оседает и удерживается загрязнений, а сама поверхность приобретает повышенную коррозионную стойкость;
- ХП удаляет дефектный поверхностный слой металла, возникший после предварительной механической обработки, вследствие чего улучшаются физико-механические свойства поверхности;
- после ХП повышается надежность работы изделий в особых условиях, например, клапанов искусственного сердца, пневмогидроаппаратуры;

– процесс отличается простотой и не требует значительных капитальных вложений.

В большинстве случаев ХП используют для декоративной отделки поверхности деталей, удаления мелких заусенцев и подготовки поверхности перед осаждением гальванических покрытий. Однако существующие в настоящее время промышленные технологии ХП наряду с достоинствами имеют ряд серьезных недостатков, таких как [6, 8, 34, 35]:

– крайне низкая работоспособность растворов (6–18 дм²/л), невозможность их корректировки, высокая стоимость как самих растворов, так и их утилизации;

– невозможность регулирования толщины удаляемого слоя металла и, как следствие, невозможность полирования прецизионных деталей;

– применение концентрированных кислот, вредных веществ и выделение в больших объемах вредных, токсичных газов (NO, NO₂ и других) и паров кислот;

– в сравнении с ЭХП и механическими доводочными методами меньшая отражательная способность, относительное сглаживание и минимально достижимая шероховатость поверхности (более *Ra* 0,2 мкм).

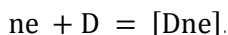
Следует отметить, что ХП сплавов на основе железа, хрома и никеля не нашло широкого применения в промышленных масштабах. По мнению авторов [34], одной из главных причин его ограниченного применения является недостаточная информация о теоретических основах механизма ХП. В работах [37–39] авторы рассматривают ХП и ЭХП как аналогичные процессы, причем ХП рассматривают как частный случай ЭХП. В обоих случаях происходит анодное растворение металла со сглаживанием поверхности и повышением ее отражательной способности. Однако в отличие от ЭХП при ХП растворение металла происходит за счет токов саморастворения в присутствии окислителей без внешней поляризации [34].

Согласно [40–42], в основе процесса саморастворения металла лежит механизм электрохимической коррозии в виде протекающих электрохимических реакций с участием свободных электронов, причем ионизация (окисление) атомов металла и восстановление окислительного компонента коррозионной среды происходят не в одной стадии. Скорости анодной и катодной реакций зависят от величины электродного потенциала металла. По данным [50] при

установлении необратимого электродного потенциала на металле Me происходит его электрохимическое растворение, включающее анодную стадию, протекающую через образование сольватированных ионов металла $Me^{n+}mH_2O$ в электролите и электронов на поверхности металла



и катодную стадию, в результате которой происходит ассимиляция электронов какими либо ионами (кроме ионов данного металла) или молекулами раствора – деполяризаторами (окислителями) D , способными к восстановлению по реакции



К необратимым электродным потенциалам относятся потенциалы почти всех металлов в растворах чужеродных (не одноименных) ионов (H_2O , $NaCl$, H_2SO_4 и других) [50]. Величина необратимых электродных потенциалов металлов определяется как внутренними, связанными с металлом, так и внешними, связанными с электролитом и физическими условиями, факторами. Влияние этих факторов на изменение величины необратимых электродных потенциалов и коррозионное поведение металлов приведено в [40, 41, 43]. На рис. 1.1 приведена обобщенная схематичная анодная поляризационная кривая металла, склонного к пассивации [34, 44].

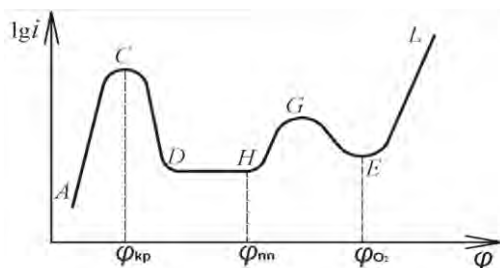
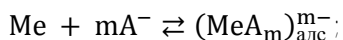


Рис. 1.1. Зависимость скорости коррозии / от потенциала φ

На участке AC , описываемом уравнением Тафеля, происходит активное растворение металла (активная область). По мере увеличения потенциала скорость растворения растет по логарифмическому закону. При превышении критического потенциала пассивации $\varphi_{кр}$ происходит торможение растворения металла, связанное с началом адсорбции кислорода на поверхности металла. При дальнейшем повышении потенциала на поверхности образуется пассивный защитный слой. Область CD представляет собой переходную область. В области пассивного состояния DH скорость растворения металла невелика и практически не зависит от потенциала. Для некоторых металлов при потенциалах положительнее потенциала перепассивации φ_{nn} наблюдается область перепассивации HG (область транспассивного состояния), обусловленная переходом этих металлов в раствор в виде комплексных ионов с более высокой степенью окисления, чем в области AC . За областью перепассивации (участок GE) может вновь наблюдаться торможение анодной реакции. В точке E с потенциалом φ_{O_2} начинается выделение кислорода. На участке EL анодная поляризационная кривая снова имеет логарифмическую зависимость. В зависимости от того, на каком участке анодная поляризационная кривая пересекается с катодной кривой можно судить о состоянии поверхности металла: активном, переходном, пассивном и т.д.

Особенностью анодного процесса в области активного растворения металла является то, что он состоит из нескольких последовательных стадий, в которых принимают участие компоненты раствора [34, 42, 44]:

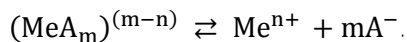
стадия 1 – адсорбция анионов раствора mA^- на поверхности металла Me с образованием поверхностного комплекса металла $(MeA_m)_{адс}^{m-}$



стадия 2 – электрохимическая стадия, определяющая переход поверхностного комплекса $(MeA_m)_{адс}^{m-}$ в раствор и скорость всего процесса:



стадия 3 – распад комплекса $(\text{MeA}_m)^{(m-n)}$ в растворе на простые ионы – катионы Me^{n+} и анионы $m\text{A}^-$



В большинстве случаев самопроизвольный анодный процесс осуществляется преимущественно за счет ионизации металла, а самопроизвольный катодный процесс – за счет восстановления молекул кислорода, ионов водорода, молекул воды и других компонентов – окислителей, присутствующих в растворе [45].

Многочисленными патентами и авторскими свидетельствами защищено большое количество составов растворов для ХП сплавов на основе железа, хрома и никеля, которые характеризуются высоким содержанием кислот (серной, азотной, соляной, ортофосфорной, фтористоводородной, щавелевой и уксусной ледяной) и окислителей, в качестве которых используют перекись водорода и хромовый ангидрид [6, 8, 34, 35, 37, 46–48]. Однако эти растворы не обеспечивают высокой отражательной способности поверхности и снижения шероховатости ниже Ra 1,25–0,63 мкм. В кислотных растворах на основе азотной, соляной, серной или ортофосфорной кислот с добавками водорастворимых полимеров и поверхностно-активных веществ лучшее качество поверхности обеспечивается лишь при ХП коррозионностойких сталей [34, 35, 46].

Эффект сглаживания поверхности при ХП авторы [37, 49] объясняют с позиций адсорбционно-пленочной теории. По их мнению, при ХП около обрабатываемой поверхности металла образуется вязкий слой из продуктов реакции. Было замечено, что эффект полирования совпадает с образованием на поверхности оксидной пленки и последующим ее восстановлением, в частности, азотистой кислотой. Для подавления травления отдельных структурных составляющих под действием микрогальванопар в состав раствора, состоявшего из смеси серной, азотной и соляной кислот, вводили органический кислотный краситель, выполнявший роль ингибитора травления [49]. Подавление травления авторы объясняют преимущественной адсорбцией красителя на анодных участках обрабаты-

ваемой поверхности. В результате, наряду со сглаживанием шероховатости, проходящим под диффузионным контролем, обеспечивается повышение отражательной способности поверхности.

В ряде работ рассматривается механизм возникновения пассивирующих пленок. Так, по данным работ [48, 50, 51] местные коррозионные токи, вызванные микрогальванопарами, способствуют созданию на поверхности металла пассивирующего слоя преимущественно оксидной природы, который, по мнению авторов работ, оказывает значительное влияние на растворение металла. При этом предполагается, что процесс ХП связан с диффузионными ограничениями в непосредственной близости от обрабатываемой поверхности и непрерывным формированием и растворением на поверхности тонкой оксидной пленки. Для получения эффекта полирования скорости этих процессов должны быть близки.

В работах [34, 46, 52] приведены результаты исследования процесса ХП сталей 10, 12Х18Н10Т и ЭИ-448. Обработку проводили в водных растворах, включавших серную, азотную и соляную кислоты с добавками водорастворимых органических соединений – полиакриламида и неионогенного поверхностно-активного вещества ОП-10, а также блескообразователя – красителя кислотного оранжевого. Было установлено, что блескообразование в процессе химического глянцеования наблюдается в области активного растворения металла (область *АС* на рис. 1.1) и происходит за счет сглаживания субнеровностей поверхности, благодаря образованию на поверхности металла пленок хелатных комплексных соединений. Показано, что ХП и химическое шлифование также протекают в области активного растворения металла. При этом комплекс водорастворимых органических соединений способствует образованию вязкого диффузионного слоя, который накапливается во впадинах профиля поверхности. В результате этого растворение металла на этих участках поверхности протекает с диффузионными ограничениями и характеризуется низкими скоростями. Сглаживание шероховатости обусловлено в основном диффузионными преимуществами выступов и практически прекращается тогда, когда радиус кривизны выступов становится равным толщине диффузионного слоя.

Таким образом, проведенный анализ литературных источников показал, что механизм ХП имеет электрохимическую природу,

основанную на коррозионных процессах. Повышение блеска поверхности связано с подавлением травления, улучшением электрохимической однородности поверхности вследствие формирования на ней пассивирующих пленок, а сглаживание шероховатости – с диффузионными ограничениями.

1.1.2.2. Электрохимическое полирование

В настоящее время ЭХП применяется в следующих случаях [6, 8, 35]:

- в качестве финишной операции при обработке изделий из коррозионностойких сталей, алюминиевых и медных сплавов, серебра, золота и гальванических покрытий, для декоративной отделки поверхности, повышения коррозионной стойкости, усталостной прочности и снижения коэффициента трения;

- для подготовки поверхности деталей перед нанесением защитно-декоративных гальванических покрытий;

- для приготовления шлифов в металлографических исследованиях и фольги для электронно-микроскопических исследований.

Широкая область применения ЭХП обусловлена тем, что при обработке происходит регламентированный по толщине съем металла и формирование поверхностного слоя, свободного от дефектов, присущих механической обработке. Основные преимущества метода ЭХП аналогичны преимуществам метода ХП [6, 34, 35]. Однако ЭХП обладает рядом существенных недостатков [6, 34, 35]:

- в качестве электролитов используются растворы концентрированных кислот с добавками вредных и токсичных веществ, что приводит к значительным затратам на специальную вентиляцию и обезвреживание вредных выбросов в окружающую среду;

- сложность корректировки растворов и их регенерации;

- сложность достижения заданной точности обработки, обусловленная влиянием нестабильности ряда факторов (напряжения на электродах, температуры, состава и степени зашламленности электролита);

- отсутствие надежных способов очистки электролитов от продуктов растворения в ионном состоянии.

ЭХП представляет собой процесс анодного растворения металла на границе раздела «металл–электролит» при значительных плотностях внешнего анодного тока. Обилие факторов, влияющих на про-

цесс анодного растворения металла, предопределило разнообразие гипотез, объясняющих механизм ЭХП. Эти гипотезы можно объединить в три группы.

К первой группе относятся диффузионные гипотезы, основанные на превалирующей роли вязкой пленки продуктов растворения в механизме сглаживания поверхности, согласно которым поверхность анода при ЭХП покрывается тонкой пленкой раствора, насыщенного продуктами анодного растворения [38, 53–56]. При этом предполагается, что толщина пленки над выступами неровностей поверхности меньше, чем во впадинах, как и электрическое сопротивление раствора электролита в этих областях. Это должно приводить к увеличению плотности тока на выступах и к более интенсивному их растворению. Автор монографии [53] связывает кинетику ЭХП с ходом анодных поляризационных кривых и полагает, что все, что способствует удалению анодных продуктов и их диффузии вглубь электролита затрудняет процесс ЭХП. Авторы работ [57, 58] также считают, что главным фактором, влияющим на скорость анодного растворения, является наличие продуктов, обладающих значительным электрическим сопротивлением. Механизм ЭХП, предложенный в [54], объясняется диффузионными процессами, а не различиями сопротивлений прохождению тока к выступам и впадинам поверхности анода. Предполагается, что максимальная скорость диффузии наблюдается на выступах, что приводит к их сглаживанию. В работе [59] предложена гипотеза о возможности разрушения пассивных пленок за счет их электрического пробоя вследствие крайней неоднородности электрического поля и изменения поверхностного натяжения пленок на выступах профиля поверхности. Иной механизм растворения в условиях ЭХП предложен в монографии [60]. Автор установил, что анодное растворение металла не во всех случаях сопровождается образованием на поверхности оксидной пленки. По его мнению, возможность растворения металла обусловлена «осцилляторным» механизмом, обеспечивающим непрерывное чередование окислительно-восстановительных реакций на поверхности металла. Первоначально выделяющийся на поверхности анода атомарный кислород окисляет выступы поверхности металла. На выступах образуется оксидная пленка, которая резко снижает силу тока и начинает преобладать процесс химиче-

ского растворения пленки, вследствие которого обнажается металлическая поверхность. После этого процесс повторяется.

Перечисленные выше представления о механизме ЭХП так или иначе основаны лишь на учете концентрационных изменений в прианодном слое. Они не получили достаточных экспериментальных подтверждений и не отражают характерных особенностей процесса ЭХП. Вязкий прианодный слой продуктов растворения отличается как по химическому составу, так и по электрическому сопротивлению от основной массы электролита и может достигать значительной толщины. Большинство исследователей согласны с тем, что при ЭХП вязкий прианодный слой играет большую роль в сглаживании неровностей профиля поверхности. Однако сглаживание субнеровностей профиля нельзя объяснить только различиями сопротивлений прохождению тока от электролита до выступов и впадин или скоростей диффузии от этих участков профиля поверхности по причине несущественного различия в размерах выступов и впадин.

Гипотезы второй группы, не снижая значимости вязкого прианодного слоя на механизм ЭХП, основаны на явлениях пассивации обрабатываемой поверхности [39, 61, 62]. В монографиях [61, 63] показано, что для успешного протекания процесса ЭХП необходимо создать условия, при которых углубления на поверхности анода обладали бы пассивностью, а выступы сохранились бы в активном состоянии и растворялись. При этом плотность электрического тока должна быть средней между вызывающей пассивность и такой, при которой анод корродирует. Предполагается, что потенциал, необходимый для выделения кислорода, достигается раньше во впадинах профиля. В условиях выделяющегося кислорода на поверхности впадин образуется тонкая пассивирующая пленка, затрудняющая растворение металла. На выступах образование пассивирующей пленки происходит с меньшей скоростью и выступы растворяются быстрее.

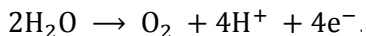
Для объяснения эффекта выравнивания и сглаживания поверхности металла при ЭХП вопрос об условиях пассивации и степени устойчивости пассивного состояния на выступах и во впадинах шероховатой поверхности имеет важное значение. Ряд авторов связывают сглаживание профиля поверхности анода с пассивностью, вызванной образованием оксидной пленки, степень совершенства которой неодинакова на участках впадин и выступов [49, 61–65].

Сравнительно меньшая степень пассивации выступов профиля объясняется более интенсивным растворением оксидной пленки вследствие ее большего несовершенства и преимущественной диффузией ионов металла и электролита. В условиях ЭХП повышение отражательной способности поверхности автор монографий [1, 35] связывает с предотвращением травления металла за счет образования на его поверхности пассивирующей пленки оксидного типа.

Согласно [64, 65], при приближении ко дну впадины переход металла из активного состояния в пассивное обусловлен резким торможением процесса ионизации металла вследствие образования фазовых оксидных и гидроксидных или адсорбционных пленок. При потенциалах анода, соответствующих наступлению пассивности (точка D на рис. 1.1), становится термодинамически возможной реакция электрохимического окисления металла [65]



При бóльшей поляризации в области положительных потенциалов (область EL на рис. 1.1) на предварительно пассивированной поверхности начинается новая электрохимическая реакция – разряд газообразного кислорода [65]



Бóльшая склонность углублений к пассивированию по сравнению с выпуклыми участками доказывается рядом работ по анодной пассивности. В работе [66] исследовалась образующаяся на металле полупроводниковая пленка. Механизм сглаживания макрорельефа авторы связывают с сопротивлением пленки, а возникновение блеска – с составом, природой, электрофизическими свойствами оксидной пленки и процессами, протекающими на границе «пленка–электролит».

В работах [67–69] исследовалось влияние поверхностно-активных веществ на механизм ЭХП. Авторы установили, что поверхностно-активные вещества, с одной стороны, являются основой для формирования вязкой пленки путем взаимодействия с продуктами анодного растворения, а, с другой стороны, адсорбируются преимущественно во впадинах поверхности и на границах кристал-

литов. Это приводит к возникновению бóльшего скачка потенциала во впадинах при наложении анодного тока и обуславливает их более глубокое пассивирование. В результате этого, по мнению авторов, создаются благоприятные условия для преимущественного растворения выступов поверхности.

К гипотезам третьей группы относится гипотеза электродекристаллизации, приведенная в работах [70–73]. Исходным положением этой гипотезы является представление об анодном растворении металла как о процессе электродекристаллизации, противоположном электрокристаллизации, имеющем место при катодном осаждении металлов. По мнению авторов работ, сглаживание шероховатости поверхности происходит в результате преимущественного растворения активных участков поверхности, к которым относятся несовершенные элементы кристаллической решетки поверхностного слоя – грани кристаллов, углы, ребра, выступы шероховатой поверхности, обладающие бóльшей энергией и поэтому растворяющиеся в первую очередь. Преимущественное растворение этих элементов поверхности приводит к образованию закономерного расположения мельчайших фигур травления, что и является причиной повышения отражательной способности поверхности. Авторы полагают, что активные участки могут оказаться и во впадинах профиля, в результате чего при ЭХП не происходит полного сглаживания шероховатости поверхности. Авторы установили, что решающим фактором в достижении блеска поверхности является ее предварительное текстурирование, повышающее электрохимическую однородность металла. В работе [71] отмечена важная роль диффузионных ограничений по акцептору, что обеспечивало постепенное уменьшение масштабов структур травления в глубину. В более поздней работе [74] отмечено большое влияние на качество полирования пассивирующих оксидных пленок, образующихся на поверхности металла. Хотя теория электродекристаллизации плохо согласуется с диффузионными представлениями о механизме ЭХП, тем не менее, структура и предварительная обработка поверхности металла безусловно оказывают большое, а иногда решающее значение на конечный результат обработки [64, 71, 73].

Работами многих исследователей установлено, что после ЭХП часто получается матовая поверхность, но с низкой шероховатостью, а иногда при незначительном сглаживании неровностей – по-

верхность с высоким блеском, т.е. одновременно обеспечить высокий блеск и необходимую шероховатость поверхности удастся не всегда. Основываясь на экспериментальных данных, авторы работ [75–82] установили, что механизмы сглаживания неровностей и получения высокого блеска имеют разную физическую природу. По их мнению, сглаживание неровностей связано с макро- и микролокальным растворением, подавлением травления за счет наступления пассивности и диффузионной кинетикой. Повышение блеска обусловлено растворением наиболее активных участков поверхности, что связано с концентрацией дефектов в кристаллической решетке металлов и их выходом на поверхность граней определенной ориентации. Аналогичное мнение в отношении механизмов наступления блеска и сглаживания неровностей поверхности в условиях ЭХП приведено в монографии [35]. Наибольший блеск поверхность приобретает при минимальной толщине оксидной пленки, которая, тем не менее, должна быть достаточной для предотвращения травящего действия электролита на металл [35, 83].

Большое влияние на экономичность процесса ЭХП, качество и производительность обработки оказывает состав раствора электролита. Выбор компонентов раствора и их соотношения, а также технологических режимов ЭХП определяется природой и химическим составом обрабатываемых сплавов. В общем случае к электролитам для ЭХП и режимам обработки предъявляются следующие требования [84]:

- анионный состав, концентрация и температура раствора электролита должны быть такими, чтобы при полировании обеспечивалась более высокая скорость растворения пассивной пленки по сравнению со скоростью взаимной диффузии реагирующих веществ и продуктов реакции;

- потенциал электрополирования должен быть достаточно положительным, чтобы обеспечить пассивное состояние обрабатываемой поверхности.

Растворы электролитов для ЭХП по входящим в их состав компонентам можно разделить на четыре группы:

- на основе хлорной и уксусной кислот;
- серной кислоты с неорганическими и органическими добавками;

– фосфорной кислоты с неорганическими и органическими добавками;

– смеси фосфорной и серной кислот с добавками и без них.

В электролитах на основе хлорной и уксусной кислот помимо конструкционных углеродистых и легированных сталей можно полировать ряд других металлов и сплавов [35]. Обработка производится при анодной плотности тока 4–6 А/дм² и напряжении обработки 45 В. Однако использование данной группы электролитов в настоящее время ограничено из-за повышенной пожаро- и взрывоопасности.

Более широкое применение нашли электролиты на основе серной кислоты с добавками лимонной кислоты или глицерина. Состав этих электролитов у разных исследователей сильно колеблется: содержание серной кислоты в растворах изменяется от 10 до 30 %, лимонной кислоты – от 10 до 70 %. Для ЭХП коррозионностойких и низколегированных углеродистых сталей эти электролиты не используют из-за низкого качества обработки [53].

Электролиты на основе фосфорной кислоты с добавкой глицерина обладают хорошими полирующими свойствами для разных марок сталей, однако полирование возможно в узком интервале плотностей тока (80–100 А/дм²) при высокой температуре электролита (120 °С) и напряжении обработки более 20 В [53].

Для ЭХП стальных изделий в промышленных масштабах наибольшее распространение получили электролиты на основе смеси фосфорной и серной кислот [69]. Дополнительное введение в их состав хромового ангидрида в количестве 5–25 % позволяет расширить ассортимент обрабатываемых сталей [69]. Обработка производится при температуре электролита 60–90 °С и плотности тока 50–60 А/дм². При повышении температуры электролита величина плотности тока может быть снижена до 30–40 А/дм².

Значительно повысить качество ЭХП различных марок сталей и сплавов в широком диапазоне рабочих температур и плотностей тока удается за счет введения в состав раствора электролита на основе фосфорной и серной кислот других неорганических кислот, а также одновременного введения добавок сразу нескольких органических и неорганических соединений. Наличие в растворе нескольких добавок приводит к синергетическому эффекту, выражающемуся в том, что совместное действие органических и неорганических веществ на анодное растворение металла оказывается более эффек-

тивным, чем действие каждого из них в отдельности. Так, в работе [69] при обработке углеродистых конструкционных и низколегированных сталей в фосфорно-сернистый электролит рекомендуется добавлять 1–2 г/л эфира дикарбоновой кислоты и 0,5–1 г/л сульфопоната, а при обработке коррозионностойких сталей – 1–5 г/л сульфопоната и 0,01–0,5 г/л пеногасителя. При ЭХП хрома, хромистых и хромоникелевых коррозионностойких сталей положительное влияние на качество полирования оказывает добавка ингибиторов коррозии БА-6, БА-12, ПБ-5 и триэтанолamina [1]. В работе [85] отмечается, что введение в электролит поверхностно-активных веществ позволяет снизить плотность тока, температуру электролита и расход электроэнергии при сохранении высокого качества обработки (блеска и сглаживания поверхности). Существенным преимуществом этих электролитов является отсутствие в них соединений хрома, что упрощает их корректирование и повышает экологическую безопасность.

На качество ЭХП оказывает большое влияние содержание воды в электролите. Увеличение ее количества приводит к росту съема металла и травлению поверхности. Слишком малое количество может послужить причиной появления дефектов на полированной поверхности [35, 68, 69, 82]. Известно [86], что помимо состава раствора электролита на качество ЭХП существенное влияние оказывают ряд факторов: температура, электропроводность, вязкость, плотность, скорость движения электролита и другие. В работах [53, 87] влиянию вязкости электролита на процесс ЭХП отводится значительная роль. Так, согласно этим данным, предельная плотность тока должна устанавливаться обратно пропорционально вязкости раствора. При ЭХП происходит нагрев электролита, в результате чего увеличивается скорость движения ионов, понижается степень поляризации и перенапряжения водорода и возрастает электропроводность раствора [66]. Это приводит к снижению электрической мощности, необходимой для поддержания заданной плотности тока. Однако при высоких температурах вязкость раствора электролита может уменьшиться настолько, что сохранение вязкого слоя на аноде может представить сложную задачу. По этим причинам следует выбирать оптимальную температуру электролита для снижения расхода электроэнергии, не снижая качества обработки.

При ЭХП на установившихся режимах происходит накопление продуктов электрохимических и химических реакций около поверхности электродов. В некоторых случаях диффузией и конвекцией не обеспечивается приток достаточного количества свежего электролита к аноду и необходимо применять принудительное перемешивание раствора. Перемешивание также предотвращает локальный чрезмерный нагрев поверхности анода, вызываемый прохождением электрического тока через слои с высоким сопротивлением, и способствует поддержанию более равномерной температуры электролита [37]. Авторами [87–89] установлено, что перемешивание электролита с оптимальной скоростью способствует улучшению качества полирования и позволяет увеличить предельную плотность тока в 3–5 раз.

ЭХП можно добиться сглаживания шероховатости поверхности до Ra 0,04–0,032 мкм, однако для этого необходима смена электролитов, режимов обработки и тщательная предварительная механическая подготовка поверхности [6, 8, 34]. Обычно в производственных условиях достигается снижение шероховатости поверхности до Ra 0,125–0,08 мкм при исходной шероховатости Ra 0,63–0,2 мкм и относительном сглаживании шероховатости 60–85 % [35]. Однако, несмотря на это, при ЭХП невозможно достичь такого высокого качества поверхности, как при механических доводочных методах обработки [1].

Таким образом, в условиях ЭХП съем металла и формирование топографии осуществляется в результате анодного растворения металлов с образованием на поверхности тонких фазовых оксидных, гидроксидных и адсорбционных пленок. Многообразие гипотез и различие во взглядах на механизм и кинетику анодного растворения связано со сложностью физико-химических процессов, протекающих на обрабатываемой поверхности.

1.2. Основные закономерности разрядных процессов в парогазовой оболочке при электролитной анодной обработке

Анодный и катодный процессы в водных растворах электролита имеют ряд существенных различий в природе физико-химических явлений, протекающих вблизи и на поверхности активного электрода, под которым понимают электрод с меньшей площадью поверх-

ности. Анодный процесс сопровождается растворением, а катодный при определенных напряженностях электрического поля – эрозией металла. Поскольку анодное растворение металла в водных электролитах приводит к сглаживанию шероховатости поверхности, то для повышения качества поверхности деталей различного назначения теоретический и практический интерес представляют исследования физико-химических закономерностей анодного процесса.

1.2.1. Анодные эффекты в водных электролитах и их технологическое применение

В работах [90, 91] показано, что при плавном повышении напряжения в диапазоне от 0 до 550 В, приложенного к активному аноду, анодный процесс последовательно проходит через пять стадий (режимов): электролиз, коммутационный режим, режим электролитно-плазменного нагрева, электрогидродинамический режим и электролитно-разрядный режим. На рис. 1.2 представлена схематичная обобщенная вольтамперная характеристика анодного процесса [91].

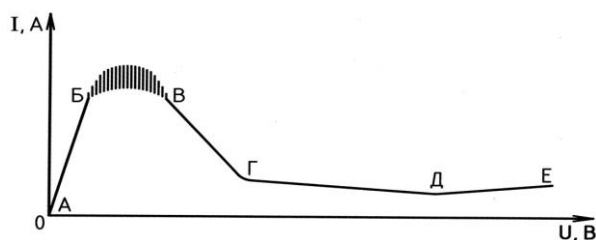


Рис. 1.2. Схематичная вольтамперная характеристика анодного процесса

Режим электролиза реализуется при относительно низких напряжениях обработки (область АВ на рис. 1.2). При этом температура анода близка к температуре электролита. Прохождение электрического тока в системе «металлический катод–электролит–металлический анод» подчиняется закону Ома, а количество металла, растворившегося на поверхности анода, связано законами Фарадея с количеством электричества, прошедшего через электролит. В режиме электролиза проводят электрохимическую обработку, в том числе ЭХП.

Повышение напряжения до 60–70 В и плотности тока до 6 А/см² приводит к установлению коммутационного режима обработки (область БВ на рис. 1.2). Режим характеризуется тем, что около поверхности анода периодически образуется светящаяся ПГО, представляющая собой первую фазу электрического разряда в электролите и приводящая к запираанию (коммутации) тока в электрической цепи в течение $\sim 10^{-4}$ с [92–95]. Вольтамперная характеристика процесса становится неустойчивой. Наблюдаются значительные по амплитуде колебания силы электрического тока. Температура анода повышается до 100 °С [96]. Цвет свечения ПГО зависит от химического состава электролита [94]. Например, голубой цвет характерен для водного раствора серной кислоты, а желтый для водного раствора серной кислоты с сульфатом натрия. Процесс сопровождается едва заметным шумом. При увеличении плотности тока от 6 до 16 А/см² ПГО начинает расширяться и равномерное, спокойное свечение дополняется появлением в оболочке отдельных искр, возникающих на различных участках анода и быстро перемещающихся по его поверхности. Процесс сопровождается «сухим» треском, характерным для искрового разряда. Авторы монографии [94] связывают свечение и искровые разряды в ПГО с образованием на поверхности вольфрамового анода полупроводниковой пленки и ее искровым пробоем, а также с электролюминесцентным эффектом. Автор работы [92] полагал, что прохождение электрического тока через ПГО и ее свечение обусловлено ионизацией газа внутри оболочки.

Исследования, проведенные А.А. Факторовичем [97], были направлены на практическую реализацию эффекта коммутации электрического тока при электроискровой размерной обработке и легировании поверхности металлов твердыми сплавами. Электролитический прерыватель тока применялся в силовых импульсных генераторах, а также в хемотронике, где электролитический прерыватель тока выполнял функции датчиков давления газа [98], температуры [99] и расхода электролита, линейных и угловых перемещений [100]. Большое число работ посвящено проблеме очистки поверхности проволоки, проката и слитков от минеральных смазок и окалины [101–104].

Дальнейшее повышение напряжения на аноде свыше 80–90 В приводит к стабилизации ПГО, снижению анодной плотности тока

до 0,5–1 А/см² и установлению третьего режима – режима электролитно-плазменного нагрева (область ВГ на рис. 1.2). Проведенные автором работы [92] исследования показали, что режим характеризуется устойчивым свечением ПГО, наличием в ней искр и нагревом анода до 165–620 °С. Автор связывал стабильность оболочки и нагрев анода с эффектом пленочного кипения электролита вблизи поверхности анода, а механизм прохождения электрического тока через ПГО – с газовыми разрядами, вызывающими ионизацию газа внутри оболочки.

Иную точку зрения на механизм прохождения тока высказал В.С. Мурас [93], который так же, как и авторы работы [105], считал ПГО диэлектрической и термоизоляционной средой, отделяющей поверхность анода от электролита. В.С. Мурас установил [106], что скачок потенциала в области ПГО составляет 93–97 % от общего падения напряжения на электролитической ванне. Автор работы полагал, что сильное электростатическое поле в ПГО вызывает прорыв (замыкание) оболочки микроскопическими электролитными мостиками, которые и обеспечивают электрическую проводимость ПГО.

Другая гипотеза о прохождении тока через оболочку была предложена в работах [96, 107, 108]. Образование ПГО авторы работ связывают с тепловым воздействием электрического тока на электролит в прианодной области и в значительно меньшей степени с электролизными процессами. Согласно этой гипотезы, электрическая проводимость ПГО обеспечивается за счет тлеющего и искровых разрядов.

Большой вклад в разработку теории и технологий высокотемпературного нагрева заготовок в анодном режиме обработки внесли академик АН МССР Б.Р. Лазаренко с учениками [96, 97, 108–113] и ряд других исследователей [114–121]. Разработанные ими технологии обеспечивают высокоскоростной нагрев заготовок до 1000 °С для последующейковки, штамповки, изготовления проката, термической и химико-термической обработки, получения заданных структур у специальных сплавов. Однако до настоящего времени нет единой общепризнанной теории, объясняющей эффект нагрева при обработке в электролите. Это связано со сложностью физико-химических процессов, протекающих на поверхности анода при повышенных напряжениях. Так, например, существующие в насто-

ящее время гипотезы не в состоянии объяснить установление электрогидродинамического режима анодного процесса.

Незначительное повышение напряжения на аноде после установления стабильного режима нагрева или изменение химического состава и концентрации раствора электролита может привести к возникновению электрогидродинамического режима (область ГД на рис. 1.2), характеризующегося наличием самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите, прогнозируемым растворением металла на поверхности анода, снижением анодной плотности тока до $0,15-0,4$ А/см² и температуры анода до $90-100$ °С [108, 109, 112, 122]. Переход от режима высокотемпературного нагрева к электрогидродинамическому исследователи связывают с увеличением толщины ПГО, ее неустойчивостью и срывом на отдельных участках поверхности анода, а также с химическим составом, концентрацией, коэффициентом поверхностного натяжения, кинематической вязкостью электролита, возникновением в электролите мелких заряженных пузырьков и наличием в ПГО коронных электрических разрядов [97, 105, 108, 112]. Предложенные гипотезы установления электрогидродинамического режима анодного процесса нам представляются спорными.

На возможность полирования поверхности металлов в электрогидродинамическом режиме обработки впервые обратил внимание В.С. Мураc [106]. По его мнению, электролитные мостики, воздействуя на поверхность анода, подвергают его эрозионной полировке. Однако, по нашему мнению, маловероятно получить зеркальную поверхность в условиях ее электрической эрозии.

В работах [94, 122] отмечается, что в коммутационном режиме обработки наблюдается интенсивное растворение поверхности анода, а в режиме электролитно-плазменного нагрева оно отсутствует или имеет очень малую величину. Исследованию эрозии анода при повышенных напряжениях посвящены работы [109, 123, 124]. Авторы работ [123, 124] установили, что поверхность образцов из стали Ст3 после обработки в режиме электролитно-плазменного нагрева в водном электролите, содержащем 3 масс.% соляной кислоты и 10 масс.% ацетона, покрыта черной оксидной пленкой FeO, образовавшейся, по их мнению, в результате высокотемпературного окисления железа. Выход металла по току в расчете на Fe²⁺ составлял от 5 до 40 %. При переходе в электрогидродинамический режим

обработки эрозия анода резко возрастала. При этом черная оксидная пленка на поверхности анода отсутствовала, а выход металла по току в расчете на Fe^{2+} составил 150–160 %. Авторы предположили, что это обусловлено процессом растворения металла при высоких анодных плотностях тока, механизм которого они не детализировали.

Авторы работы [109] исследовали эрозию поверхности анода из стали 10 и хрома при электролитно-плазменном нагреве и в электрогидродинамическом режиме при обработке в водных растворах серной кислоты, хлорида аммония, гидроксида и хлорида натрия. Было установлено, что наибольшая скорость эрозии наблюдалась в электрогидродинамическом режиме в области напряжений 220–280 В при обработке в 20%-м водном растворе хлорида аммония. При этом максимальный выход металла по току составил 220 % для стали 10 в расчете на Fe^{2+} и 400 % для хрома в расчете на Cr^{3+} . В режиме электролиза выход по току для стали 10 был близок к 100 %. При обработке в электрогидродинамическом режиме в 2%-м водном растворе гидроксида натрия максимальный выход по току для стали 10 составил 31 % и 130 % для хрома. В этом же электролите в режиме электролиза выход по току для стали 10 не превышал 0,5 %. Аналогичные зависимости растворения хрома и стали 10 от напряжения обработки авторы получили для 20%-го водного раствора хлорида натрия и 30%-го водного раствора серной кислоты. При этом максимальное значение выхода металла по току при обработке в 30%-ном растворе серной кислоты достигало 500 % для хрома и 300 % для стали 10. Авторы работы объясняют повышенный съем металла при обработке в электрогидродинамическом режиме комбинацией интенсивного электрохимического растворения и электрической эрозией поверхности анода под действием искровых разрядов.

Авторам патента [125] удалось обеспечить полирование заготовок из одно- и многофазных сплавов, в частности из латуни, в режиме электролитно-плазменного нагрева с приданием поверхности зеркального вида. Однако большинство ученых, занимающихся исследованием процесса полирования металлов и сплавов в водных электролитах при высоких напряжениях обработки, начиная с момента выдачи первого авторского свидетельства [126], обоснованно считают, что высокого качества поверхности можно достичь только в электрогидродинамическом режиме обработки. Метод полирова-

ния, разработанный в Белорусском политехническом институте, получил название ЭИП металлов и сплавов [127, 128]. Следует отметить, что недостаточная изученность физико-химических закономерностей электрогидродинамического режима обработки и необоснованное предположение исследователей о механизме электрической проводимости ПГО, связанном с электрическими разрядами типа тлеющего или коронного, послужило основанием для использования термина «электролитная плазма», а метод ЭИП впоследствии был назван плазменно-электролитной полировкой [129], электролитно-плазменной [105] и электролитно-разрядной обработкой (полировкой) [130]. По этим причинам англоязычное название метода до настоящего времени также необщепринято: Plasma-electrolytic polishing (США, Словакия) [131, 132], Plasma polishing (EPP process) (Германия, Нидерланды) [133, 134], Electro plasma polishing (Китай) [135] и Electro-discharge polishing (Болгария) [136]. Поэтому в дальнейшем будем придерживаться первоначально предложенного названия метода.

В настоящее время ЭИП используется для финишной обработки преимущественно наружных поверхностей деталей различного назначения, изготовленных из сплавов на основе железа, хрома, никеля и цветных металлов, с одновременным удалением заусенцев и округлением острых кромок [91, 105, 126–129, 137–154], для подготовки поверхности перед нанесением вакуумно-плазменных покрытий [155, 156], для удаления дефектных вакуумно-плазменных покрытий [157–161], оксидных пленок и окалины небольшой толщины и очистки поверхности деталей от минеральных и органических загрязнений [162, 163], а также для восстановления внешнего вида изделий, утративших свои первоначальные декоративные свойства в результате эксплуатации или воздействия неблагоприятных внешних факторов [164, 165].

Монография [95] является одной из первых систематизированных работ, посвященных исследованию электролитно-разрядного режима анодной обработки. Изучая разрядные явления на алюминиевом аноде при напряжении свыше 340 В, авторы обнаружили «вытеснение искр» с поверхности анода в отчетливо наблюдаемые газовые пузырьки. Разряд как бы внедряется в электролит [166]. В отличие от падающей вольтамперной характеристики электрогидродинамического режима повышение напряжения обработки свыше

400 В приводит к увеличению тока разряда (область ДЕ на рис. 1.2) и толщины ПГО [167]. В коротком свободно горящем разряде с электролитным катодом могут возникать автоколебания, период которых зависит от состава электролита, материала анода и параметров электрической цепи. С этим эффектом авторы работы [168] связывают нестабильность вольтамперной характеристики при напряжениях обработки свыше 350 В. На основании анализа литературных источников авторы монографии [169] полагают, что разряд в ПГО при напряжении обработки свыше 350 В является тлеющим.

Электролитно-разрядный режим анодной обработки пока не получил широкого применения в промышленных масштабах. В основном он используется для оксидирования поверхности вентиляемых металлов – алюминия, титана, тантала, ниобия, циркония и сплавов на их основе [169–175], а также для плазменно-электролитической поликонденсации на поверхности анода неорганических полимерных соединений и для синтеза на поверхности металлов и сплавов алюмосиликатов из суспензий [176]. В последнее время ведутся работы по применению электролитно-разрядного режима обработки для одностадийного получения оксидного порошка и наноразмерных порошков металлов [177–179], для локальной обработки поверхности металлов и сплавов с целью ее очистки, модифицирования, полирования и упрочнения [180–183], для очистки воды от органических и неорганических примесей и определения концентрации металлов в сточных водах [184–188], для модифицирования поверхности полимерных материалов и отбеливания тканей [187] и для стерилизации растворов, материалов и предметов медицинского назначения [189].

Таким образом, анодный процесс при различных напряжениях обработки имеет многочисленные области практического применения. Обработка в электрогидродинамическом режиме позволяет производить полирование заготовок, изготовленных из различных металлов и сплавов, с одновременным притуплением острых кромок, удалением заусенцев, оксидных пленок, минеральных и органических загрязнений. Однако недостаточная изученность механизма электрической проводимости ПГО, тесно коррелирующего с механизмами съема металла и формирования топографии, и противоречивость имеющихся экспериментальных данных сдерживают разработку новых высокоэффективных технологий ЭИП сплавов на

основе железа, хрома и никеля, обеспечивающих формирование поверхности деталей с заданным комплексом механических свойств, точности, геометрических параметров качества и эксплуатационных характеристик.

1.2.2. Современные представления о механизме электрической проводимости парогазовой оболочки в условиях электролитной анодной обработки

Повышенное напряжение на электродах и сплошная ПГО около поверхности металлического анода приводят к тому, что механизм прохождения электрического тока в системе «водный раствор–ПГО–металлический анод» принципиально отличается от механизма прохождения тока в режиме электролиза. На основании результатов спектральных исследований излучения ПГО в коммутационном режиме обработки [94], в режимах электролитно-плазменного нагрева [190] и электролитно-разрядном [181, 191] авторы работ делают вывод о наличии в ПГО электрического разряда. В спектрах излучения авторами обнаружены линии и полосы атомарного водорода и кислорода, радикала OH и линии, связанные с компонентами раствора электролита.

По определению [192, 193], газовый электрический разряд представляет собой процесс протекания электрического тока через газ вследствие образования в активной части разряда (катодном слое) свободных носителей заряда путем лавинообразной генерации заряженных частиц при ударной ионизации газа электронами, ускоряемыми электрическим полем в направлении от катода к аноду. При этом полный электрический ток разряда равен сумме электронного тока, тока положительных ионов и тока отрицательных ионов. Особенностью электрического разряда в ПГО при электролитной анодной обработке является отсутствие электронной проводимости в электролите и низкая температура электролитного катода – в приразрядной области она меньше критической температуры воды равной $374\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако следует отметить, что факт наличия и генерации валентно несвязанных электронов в приразрядном слое электролитного катода экспериментально доказан для электролитно-разрядного режима обработки [169, 194–199]. В ряде работ отмеча-

ется, что специфика электролитного катода резко ограничивает возможные механизмы эмиссии электронов из электролита.

Механизм дискретной электрической проводимости ПГО при электролитно-плазменном нагреве предложен авторами работ [200, 201]. В эксперименте, описанном в [200], анод предварительно нагревался переменным электрическим током до температуры 700–900 °С, после чего на него подавалось напряжение 150 В и проводились спектральные исследования излучения ПГО. Возникновение электрической проводимости в ПГО не сопровождалось никакими визуально наблюдаемыми изменениями цвета свечения ПГО. Спектр свечения, полученный с помощью монохроматора в видимой области спектра, соответствовал излучению нагретого тела (анода), на основании чего авторы сделали вывод об отсутствии электрических разрядов в ПГО и предложили режим электролитно-плазменного нагрева назвать режимом анодного электролитного нагрева. По их мнению, наличие в ПГО электрического поля изменяет состояние иона вне электролита. Вместо потенциального порога возникает потенциальный барьер, облегчающий эмиссию заряженных частиц в ПГО (эффект Шоттки). Эмиссия происходит в местах наибольшего приближения к аноду колеблющейся поверхности раздела «раствор–пар», поскольку именно там достигается наиболее высокая напряженность поля и концентрация избыточных ионов. Такие участки играют роль временных центров эмиссии ионов. Следовательно, по мнению авторов [200], перенос заряда носит импульсный характер, а наблюдаемый электрический ток является суммой перекрывающихся во времени импульсов тока из разных центров эмиссии ионов. Увеличение анодного напряжения приводит к увеличению концентрации избыточных зарядов в центрах эмиссии и ускоряет их перенос на анод. Это вызывает увеличение амплитуды и снижение длительности элементарного импульса тока из одного центра эмиссии. Низкочастотные пульсации электрического тока авторы связывают с колебаниями поверхности раздела «электролит–пар». Однако возможный механизм эмиссии ионов из электролита в ПГО авторами работ не раскрывается.

В монографии [112] авторы, основываясь на результатах анализа литературных источников и на данных собственных экспериментальных исследований пробоя воздушного межэлектродного промежутка в системе «металлический электрод–воздух–

электролитный электрод», предложили физическую модель прианодной области, согласно которой в ПГО наряду со стационарным тлеющим разрядом эпизодически возникают искровые разряды. Возникновение искровых разрядов, по мнению авторов, происходит в местах наибольшего сближения электролита с поверхностью анода, в которых под действием высокой напряженности электрического поля происходит распыление электролита в виде электризованных микрокапель и зажигание искровых разрядов. Авторы полагают, что искровые разряды могут также возникать непосредственно между поверхностью анода и электролитом на участках, где толщина ПГО становится достаточно малой. По их мнению, при бомбардировке положительными ионами поверхности электролитного катода на границе «ПГО–электролитный катод» выбиваются электроны, в том числе гидратированные, и отрицательные ионы. В результате последующей ионизации атомов и молекул ПГО, производимой выбитыми электронами и отрицательными ионами, возникает электрический разряд в ПГО, который обеспечивает электрическую проводимость ПГО. Кроме того, авторы считают, что существенную роль в образовании свободных электронов могут играть химические реакции в прикатодной области и области электрического разряда.

Экспериментальным исследованиям характеристик разряда в ПГО в режиме электролитно-плазменного нагрева посвящены работы [190, 202]. Измеренные величины приэлектродных падений потенциалов в электролитной плазме оказались на порядок ниже соответствующих величин для тлеющих разрядов и ближе к падениям в дуговых разрядах. Поскольку экспериментально наблюдаемый характер распределения потенциалов в электролитных разрядах отличался от распределений во всех известных типах электрических разрядов, то, по мнению авторов, разряд в электролитах является новым типом разряда, а нагрев анода обеспечивается током заряженных частиц, преимущественно ускоренных ионов. Однако возможный механизм эмиссии ионов из электролита в ПГО авторами работ не раскрывается.

В работах [203, 204] на основании теоретических модельных исследований разряда в режиме электролитно-плазменного нагрева авторы делают вывод о том, что электрический ток в ПГО обязан своим существованием тепловому испарению ионов с поверхности

электролитного катода. Испаренные ионы в плазме разряда сталкиваются с нейтральными молекулами и атомами ПГО, в том числе с возбужденными. Авторы полагают, что в результате этих столкновений происходит освобождение электронов, которые порождают электронные лавины. Электронные лавины обеспечивают электрический ток в ПГО и способствуют появлению в оболочке большого количества положительных ионов.

Авторы монографии [205] априори полагают, что электрическая проводимость и свечение ПГО в режиме ЭИП обусловлены стационарным тлеющим разрядом в ПГО и эпизодически возникающими искровыми разрядами. Проводя необоснованную аналогию с основными закономерностями процесса электролитно-плазменного нагрева, приведенными в [108, 112, 122], они утверждают, что полирование поверхности анода возможно при наличии стабильной ПГО, возникшей в результате пленочного кипения электролита на поверхности анода, нагретого свыше $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Основываясь на закономерностях пленочного кипения жидкости, авторы предложили физико-математическую модель прианодной области. Произведенная ими численная оценка и представленная в [205] в виде графиков зависимостей плотности тока, температуры анода и толщины ПГО от напряжения обработки, температуры электролита и подвижности носителей зарядов дала следующие диапазоны величин: плотность электрического тока $0,01\text{--}0,08\text{ А/см}^2$, температура анода $190\text{--}630\text{ }^{\circ}\text{C}$, толщина ПГО $0,058\text{--}0,14\text{ мкм}$. Однако экспериментальные данные, приведенные в многочисленных научных публикациях, явно противоречат приведенным в [205] теоретическим оценкам. Так, экспериментальные данные по плотности тока выше в 10 раз, по толщине ПГО выше в 100 раз, а температура анода в режиме ЭИП не превышает $112\text{ }^{\circ}\text{C}$ [108, 109, 112, 122, 206], что свидетельствует о неадекватности предложенной физико-математической модели.

В работе [207] в ходе осциллографических исследований было установлено, что в электрогидродинамическом режиме обработки электрический разряд в ПГО протекает нестабильно. Частота основных колебаний электрического тока разряда лежит в диапазоне от 400 до 800 Гц, причем основные низкочастотные колебания как бы модулированы высокочастотными колебаниями тока. Высокочастотную составляющую электрического тока авторы работы связы-

вают с характером рельефа поверхности металлического анода и разрядом в ПГО преимущественно на выступах неровностей поверхности анода.

В работах [107, 169, 194, 195, 208–210] разряд в ПГО в электролитно-разрядном режиме обработки классифицируются как тлеющий, для которого характерны неравновесные механизмы переноса электрона через границу раздела «катод–плазма разряда». В монографии [169] на основе обширного анализа литературных данных показано, что эмиссия электронов из электролитного катода в область тлеющего разряда не может обеспечиваться известными механизмами эмиссии электронов из металлов и других твердых тел (термоэлектронной, термополевой, автоэлектронной, потенциальной ионно-электронной и фотоэлектронной эмиссией). В работах [181, 211] предложена физическая модель разряда между металлическим анодом и электролитным катодом в электролитно-разрядном режиме обработки. Согласно модели, катодный слой разряда с напряженностью электрического поля около $10^8 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ является ускорителем заряженных частиц. Положительные ионы, рожденные в катодном слое, ускоряются полем в направлении электролита. При катодном падении потенциала $U_k=400\text{--}900 \text{ В}$ протон, ускоряясь в направлении катода и имея энергию $400\text{--}900 \text{ эВ}$, при соударении в электролитном катоде с нейтральной частицей или ионом передает связанному в молекуле или ионе электрону энергию $0,4\text{--}0,8 \text{ эВ}$, которая существенно меньше потенциала ионизации воды, но близка к энергии связи электрона в отрицательном ионе. По мнению авторов [181, 211], в результате соударения происходит отрыв электрона от отрицательного иона, находящегося в электролите на границе фаз «электролит–ПГО», и переход электрона в газовую фазу разряда. Предложенный механизм основывается на данных, приведенных в [212], и, по мнению автора работы [181], обеспечивает слабую эмиссию электронов из электролитного катода в зону разряда с коэффициентом ионно-электронной эмиссии $\gamma=10^{-3}\text{--}10^{-5}$. Попавшие в зону разряда электроны в прикатодной области разряда ускоряются в направлении анода и ионизируют газовые молекулы воды с образованием молекулярных ионов H_2O^+ , которые при соударениях с другими частицами с энергией свыше $6,2 \text{ эВ}$ фрагментируют на протон и радикал OH . Далее протоны под действием катодного падения потенциала ускоряются в направле-

нии поверхности электролита и замыкают описанный процесс. Однако в математической модели зажигания разряда автор работы [181] пренебрегает описанной выше вторичной эмиссией электронов из электролитного катода ввиду ее незначительности. Полагая, что газ в ПГО является оптически тонким, а электрическое поле в ней однородно, автор делает вывод о том, что при зажигании разряда развитие электронных лавин возможно лишь тогда, когда вторичные электроны образуются в ПГО в результате фотоионизации или за счет столкновения нейтральных частиц с ионами.

В работе [210] рассмотрены возможные механизмы переноса электрона через границу раздела «электролитный катод–плазма разряда» за счет потенциальной и кинетической ионно-электронной эмиссий. Показано, что эмиссия электронов в плазму разряда за счет потенциальной ионно-электронной эмиссии невозможна по энергетическим и стехиометрическим причинам. Согласно предложенной теоретически и экспериментально обоснованной авторами физической модели эмиссия электронов в плазму разряда обеспечивается механизмами кинетической ионно-электронной эмиссии и включает две стадии – внутреннюю и внешнюю. На первой стадии в приразрядном объеме электролита в результате ионизации компонентов водного раствора положительно заряженными ионами H^+ происходит рождение валентно несвязанных электронов с их быстрой последующей гидратацией. На второй стадии эмиссия электронов происходит преимущественно за счет испарения в область газового разряда тонкого приразрядного слоя электролита, содержащего рожденные на первой стадии гидратированные электроны. Энергии ускоренных в разряде ионов, по мнению авторов [197, 210], может оказаться достаточно, чтобы по механизму, подобному радиолизу, в приразрядной области электролита получить необходимое для поддержания разряда количество избыточных электронов. Предложенный механизм хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в [197, 213]. На основании теоретических исследований и экспериментальных данных авторами [210] произведена численная оценка средней скорости образования избыточных электронов в единице приразрядного объема электролита и стационарной концентрации гидратированных электронов. Основываясь на полученных численных оценках, авторы полагают, что основную

долю электрического тока в ПГО составляет поток ускоренных положительных ионов из разряда в сторону электролитного катода.

Согласно [191], катодное распыление электролита приводит к переносу нейтральных кластеров в плазму разряда. По мнению авторов работы, в плазме разряда молекулы растворенного вещества под действием ускоренных частиц или температуры фрагментируют на анионы и катионы. Катионы и анионы электролита участвуют в переносе заряда через плазму разряда и обеспечивают электрическую проводимость ПГО. Авторы считают, что, если в качестве электролита используется галогенид щелочного металла, то под действием ионного удара молекула галогенида получает не только колебательное, но и электронное возбуждение, а последующая ее диссоциация дает возбужденный до резонансного состояния атом щелочного металла. При этом излучение возбужденного атома будет ограничено тонким слоем катодного пятна около поверхности электролитного катода.

В работах [187, 214] рассмотрен один из возможных механизмов электрической проводимости ПГО за счет тока анионов при испарении электролита в приразрядной области. С каждой из сторон межфазной границы «плазма разряда–электролит» существует диффузный двойной слой. Со стороны плазмы это область положительного объемного заряда вблизи электролита, формирующая прикатодное электрическое поле в области катодного падения потенциала разряда. В приразрядном объеме электролита это область отрицательного объемного заряда, образованного избыточным количеством анионов в поле положительного электрода (анода). Авторы считают, что анионы электролита могут попасть в плазму разряда одним из следующих способов или их комбинацией:

1. Послойное испарение объема электролита, непосредственно граничащего с плазмой, с сохранением его химического состава;
2. Катодное распыление жидкой фазы в виде кластеров или мелких капель с последующим полным или частичным испарением в плазме разряда. Количество молекул в кластере, по данным [215], может превышать $1 \cdot 10^4$;
3. Избирательное испарение компонентов электролита с обогащением газовой фазы разряда более летучим компонентом.

Согласно численным оценкам, доля анионного тока может составлять 24 % в суммарном токе разряда при катодном падении по-

тенциала около 400 В и концентрации электролита 0,5 моль/л [186] и 70 % для одномолярного раствора [214].

Одним из возможных механизмов переноса электролита в плазму разряда, по мнению авторов работ [204, 216, 217], является реализация на заряженной поверхности электролита комбинации неустойчивостей Кельвина–Гельмгольца и Тонкса–Френкеля. На финальной стадии развития неустойчивости на заряженной поверхности электролита в приразрядной области образуются эмитирующие выступы с большой кривизной, с которых может происходить эмиссия сильно заряженных микрокапель и кластеров в ПГО.

В то же время имеется большое количество экспериментальных данных, свидетельствующих о приближении отдельных участков электролита на границе раздела фаз «электролит–ПГО» к металлическому аноду [96, 97, 112, 122, 218], замыкании электролитом разрядного промежутка [112, 219] и переносе электролита через разрядный промежуток на поверхность анода [112, 220]. Согласно [112], при анодном процессе структура ПГО определяется составом, физико-химическими свойствами электролита и напряжением на электродах. Для режима электролитно-плазменного нагрева авторы монографии [221] на основании произведенных тепловых расчетов доказали, что формирование сплошной и устойчивой ПГО около поверхности анода происходит в результате локального вскипания электролита под действием джоулева тепла, вызванного протеканием в электролите электрического тока.

Механизм образования ПГО авторы монографии [112] также считают тепловым. Под действием электростатических сил, давления газа в ПГО и поверхностного натяжения ПГО вибрирует с частотой 20–100 Гц и имеет различную толщину. По мнению авторов, в электрогидродинамическом режиме обработки в ПГО наряду с кислородом, выделяющимся на поверхности анода, содержится значительное количество водорода, образовавшимся в результате разложения паров воды в области электрических разрядов. Они считают, что электрическое поле и аномальный электролиз значительно интенсифицируют теплообмен в системе «анод–ПГО–электролит», что приводит к сильной турбулизации электролита и срыву ПГО на отдельных участках поверхности анода. Таким образом, авторы монографии, не говоря об этом прямо, указывают на

стохастический пробой ПГО электролитом и периодический контакт электролита с поверхностью анода.

В работе [222] приведены результаты осциллографических исследований электрического тока, протекающего через ПГО, для трех режимов анодной обработки: электролитно-плазменного нагрева, электрогидродинамического и электролитно-разрядного. Автором установлено, что ток разряда в своем составе имеет постоянную и высокочастотную составляющие. Показано, что зависимости уровня постоянной и амплитуды переменной составляющих тока от температуры электролита, напряжения обработки и площади поверхности образца имеют сложный характер. Так, величина постоянной составляющей тока возрастает линейно при увеличении площади обрабатываемой поверхности и снижается на 36–41 % при повышении температуры электролита на каждые 10 °С в диапазоне 60–80 °С. В то же время площадь поверхности образца и температура электролита не оказывают заметного влияния на амплитуду и частоту переменной составляющей тока разряда. Показано, что наибольшее влияние на амплитуду переменной составляющей оказывает напряжение обработки. Постоянную составляющую тока автор связывает с ионной проводимостью ПГО, а переменную – с замыканием ПГО электролитными мостиками.

В работе [223] изучались спектральные характеристики радиоизлучения и тока разряда при ЭИП образцов из углеродистой и коррозионностойкой сталей в зависимости от химического состава, шероховатости поверхности образцов и степени выработки электролита. На основании полученных данных авторы делают вывод о том, что радиоизлучение и переменная составляющая электрического тока разряда несут информацию о химическом составе, шероховатости поверхности и степени выработки электролита. Однако приведенные результаты исследования и основанные на них выводы вызывают сомнение в связи с отсутствием информации об использованных в экспериментальной установке приборах, составах растворов электролита, марках материалов образцов и величине напряжения обработки. В работе предлагается физическая модель процесса ЭИП, согласно которой электрическая проводимость ПГО обеспечивается за счет искровых разрядов. Авторы считают, что на первой стадии искрового разряда происходит стримерный пробой ПГО. Однако строго физического обоснования возможности стри-

мерного пробоя оболочки при электролитном катоде или ссылок на литературные источники в работе не приводится. Авторы работы также считают, что электрический ток может протекать по тонким электролитным мостикам, замыкающим ПГО.

Информация о толщине ПГО имеет важное значение для установления и изучения основных закономерностей механизма электрической проводимости оболочки. Однако до настоящего времени у исследователей нет единого мнения о толщине ПГО. Так, согласно данным, основанным на визуальных наблюдениях, толщина оболочки составляет 0,2–0,8 мм [106]. В работе [96] толщина оболочки, измеренная на фотографии, равнялась 50 мкм. Там же приводится информация о толщине оболочки от 3 до 160 мкм. Авторы работы [122], изучая процесс нагрева с помощью скоростной киносъемки, оценили толщину оболочки в 70–250 мкм. Теоретическая оценка толщины ПГО выполнена в работе [224]. Приведенные данные показывают, что толщина оболочки зависит от напряжения обработки и температуры электролита. При повышении напряжения от 100 до 250 В толщина ПГО увеличивается с 10,3 до 24,4 мкм для 13%-го водного раствора хлорида аммония при температуре электролита 20 °С. Повышение температуры электролита с 15 до 45 °С при напряжении обработки 200 В увеличивает толщину ПГО с 18 до 19,9 мкм. Следует отметить, что приведенные данные были получены для режима электролитно-плазменного нагрева.

В условиях ЭИП авторы работы [223] по результатам визуальных наблюдений и анализа фотографий, полученных с помощью цифрового фотоаппарата, оценили толщину ПГО в пределах от 0,01 до 1,2 мм. Однако, на наш взгляд, измерения, выполненные по фотографиям, имеют большую погрешность, т.к. оболочка представляет собой динамически устойчивую систему, непрерывно изменяющую свои размеры в некоторых пределах. Теоретическая оценка толщины ПГО в режиме ЭИП, выполненная нами ранее [225], показывает хорошее согласие с литературными данными.

Таким образом, анализ литературных данных выявил многообразие и противоречивость гипотез об электрической проводимости ПГО в условиях электролитной анодной обработки. Механизм электрической проводимости теоретически и экспериментально обоснован только для электролитно-разрядного режима обработки. Несмотря на проведенные многочисленные экспериментальные и

теоретические исследования и научно-практическую значимость механизма электрической проводимости ПГО при формировании топографии в условиях ЭИП, механизм и его основные закономерности до сих пор не установлены.

1.3. Электроимпульсное полирование заготовок из сплавов на основе железа, хрома и никеля

ЭИП, обладая преимуществами, присущими ХП и ЭХП, выгодно отличается от них высокой производительностью и стабильностью качества обработки, экологической безопасностью, низкой себестоимостью обработки единицы поверхности и возможностью полной автоматизации управления и контроля параметров процесса [128,133–136, 154, 164, 165, 205, 222]. Однако для того, чтобы в полной мере реализовать все преимущества ЭИП требуется провести комплексные исследования основных физико-химических и технологических закономерностей процесса ЭИП и создать на этой основе оборудование, соответствующее современному мировому уровню развития машиностроения. По этой причине проведем анализ известных данных о физико-химических и технологических закономерностях процесса ЭИП.

1.3.1. Факторы, влияющие на стабильность процесса электроимпульсного полирования, производительность, точность обработки, качество и эксплуатационные характеристики поверхности деталей

Стабильность процесса ЭИП. Одним из основных факторов, влияющих на стабильность процесса ЭИП, является соотношение площадей поверхностей анода S_a и катода S_k ($\Delta = S_a : S_k$) [226, 227]. При нарушении баланса площадей происходит инверсия анодного процесса в катодный. Анодный электрогидродинамический режим обработки скачкообразно меняется на режим катодного нагрева. При этом ПГО исчезает около поверхности анода (обрабатываемой заготовки) и одновременно возникает около поверхности катода. Поверхность заготовки начинает интенсивно травиться, что приводит к потере ее качества и точности. При характерных для процесса ЭИП напряжениях обработки в ПГО около поверхности катода за-

жигается аномальный тлеющий разряд [193], приводящий к интенсивной эрозии и разогреву катода вплоть до его плавления. Катод разрушается и выходит из строя. На рис. 1.3 представлен внешний вид анодного процесса в режиме ЭИП и катодного процесса в режиме нагрева [222].

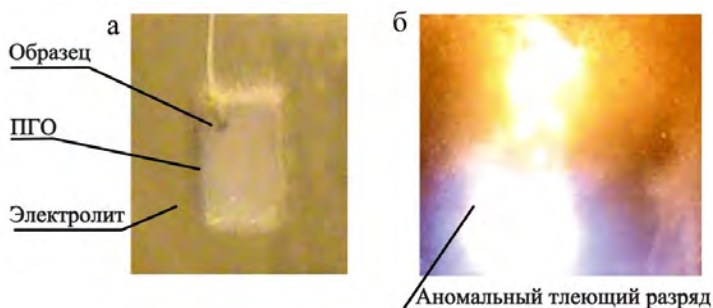


Рис. 1.3. Внешний вид анодного (а) и катодного (б) процессов при напряжении обработки 300 В

В установках ЭИП катодом обычно служит корпус электролитической ванны. Отметим, что учет перечисленных обстоятельств важен при расчете максимально допустимой загрузки ванны. Однако на сегодняшний день экспериментально обоснованного соотношения площадей поверхностей электродов для процесса ЭИП не установлено. Так, опираясь на опыт ЭХП, авторы работ [226, 227] утверждают, что соотношение площадей поверхности электродов как в режиме электролитно-плазменного нагрева, так и в электрогидродинамическом режиме должно составлять более чем $\Delta=1:5$. Таким образом, несмотря на очевидную практическую значимость стабильности процесса ЭИП, этому аспекту не уделено должного внимания.

Производительность и качество обработки. Одним из основных факторов, существенно влияющим на ход анодного растворения металла при ЭИП и в значительной мере определяющим производительность обработки и качество поверхности, является химический состав и свойства электролита. К настоящему времени разработано достаточно большое количество составов электролита для ЭИП заготовок из различных сталей и сплавов. Однако следует

отметить, что из-за отсутствия в литературе информации о возможных химических и электрохимических реакциях, протекающих на поверхности электродов, в ПГО и электролите, значительно затруднен целенаправленный поиск составов электролита для ЭИП различных по химическому составу и свойствам металлов и сплавов.

Наибольшее распространение для ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей получили электролиты на основе водных растворов солей аммония. В авторском свидетельстве [126] для ЭИП коррозионностойких сталей впервые предложен 2–6%-й водный раствор сульфата аммония. Авторами работ [90, 222] установлено, что оптимальным составом для ЭИП низколегированных углеродистых сталей является 1–4%-й водный раствор хлорида аммония. Большой вклад в разработку составов электролитов внесли ученые Белорусского национального технического университета [140–142, 228] и Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси [129, 137–139]. Разработанные составы позволяют полировать изделия, изготовленные из сплавов на основе железа, хрома и никеля, а также из цветных металлов и сплавов на их основе.

Управлять производительностью и качеством обработки путем регулируемого съема металла с обрабатываемой поверхности возможно за счет выбора состава раствора электролита. Так, введение маннита в количестве 0,5–4 % в 2–6%-й водный раствор сульфата аммония при ЭИП сталей 0,8кп, 12Х18Н9Т и 40Х13 позволило повысить скорость съема металла на 16,7 % и блеск поверхности на 49–53 % при относительном сглаживании шероховатости 70–79 % [141, 229]. Однако, несмотря на расширение технологических возможностей процесса ЭИП, промышленное применение двух- и трехкомпонентных электролитов, составы которых, в частности, приведены в [129, 138, 141], сопряжено со значительными трудностями по корректировке концентрации компонентов растворов вследствие их неравномерной выработки в процессе работы.

Согласно описанию к патенту [230], повышение производительности и качества обработки может быть достигнуто за счет применения импульсного источника тока. По данным автора, ЭИП поверхности с исходной шероховатостью Ra 6,3 мкм за 1–3 мин снижает шероховатость до Ra 0,01 мкм. Однако, учитывая результаты исследований, приведенные в работах [90, 151, 152, 222, 231], меха-

низм формирования топографии, предложенный в [222], и отсутствие в описании к патенту сведений о способе применения импульсного источника тока и о его влиянии на интенсивность обработки ставят под сомнение возможность достижения заявленных результатов.

Повышение производительности и качества обработки при одновременном снижении в 1,5–2 раза энергоемкости процесса ЭИП в [130] предполагается обеспечить за счет дополнительного наложения на заготовку ультразвуковых колебаний с амплитудой 5–50 мкм и частотой 20 кГц. По мнению авторов, под действием ультразвуковых колебаний заготовка будет перемещаться внутри ПГО и периодически приближаться к поверхности колеблющегося электролита, что приведет к снижению плотности тока и повышению производительности обработки. Однако в работе отсутствует экспериментальное обоснование предлагаемого решения, что ставит под сомнение возможность достижения предполагаемого результата.

В патенте [131] предлагается повысить производительность обработки при одновременном снижении энергопотребления процесса ЭИП и риска поражения обслуживающего персонала электрическим током за счет полирования в течение 2–60 с при напряжении до 80 В в электролитах, содержащих сильные неорганические кислоты. Так, для обработки коррозионностойких сталей предлагается использовать водный раствор, содержащий наряду с другими компонентами 70 % фосфорной кислоты. Следует отметить, что применение этих электролитов резко снижает экологическую безопасность процесса ЭИП.

Повысить производительность на 45–50 % и качество обработки предлагается в патенте [227] за счет автоматического поддержания параметров технологического процесса в узком диапазоне значений и автоматизации операций полирования, промывки заготовок и их загрузки–выгрузки путем применения автоматизированного комплекса ЭИП.

Большое внимание исследователями уделяется изучению влияния температуры электролита на интенсивность съема металла и качество обработки при ЭИП. Нами впервые было установлено [233], что повышение температуры электролита приводит к значительному снижению величины съема металла вне зависимости от химического состава и вида термообработки обрабатываемого

сплава. Позже аналогичные результаты были получены авторами работ [152, 153, 222, 230, 234, 225]. Было установлено, что, чем ниже температура электролита, тем интенсивнее протекает процесс ЭИП, но при этом увеличивается риск смещения процесса в область коммутационного режима, сопровождающегося «бросками» тока, дуговыми разрядами между технологической оснасткой и обрабатываемой заготовкой, прижогами острых конструктивных элементов заготовки. Увеличение съема металла авторы работ [152, 153, 230, 234, 235] связывают с уменьшением парообразования, формирующего ПГО, и повышением интенсивности протекающих в ПГО физико-химических процессов в результате относительного увеличения концентрации агрессивной газовой фазы в ПГО. Однако до сих пор механизм съема металла в условиях ЭИП, учитывающий природу обрабатываемого материала, физико-химические свойства электролита и режимы обработки, однозначно не установлен.

Нами впервые было установлено [236], что при ЭИП низкотемпературных углеродистых и коррозионноустойчивых сталей минимально достижимая шероховатость поверхности составляет Ra 0,03–0,02 мкм. При этом динамика изменения и уровень достигаемой шероховатости определяются величиной исходной шероховатости поверхности, составом раствора электролита, технологическими режимами обработки, микроструктурой и фазовым составом обрабатываемого сплава. В более поздних работах других авторов были получены аналогичные результаты [132, 148–152, 231, 234, 235]. Однако приведенные в этих работах данные об изменении шероховатости поверхности в процессе ЭИП, на наш взгляд, являются неполными и носят частный характер, поскольку не учитывают в полной мере влияние всех параметров режима обработки на динамику снижения шероховатости. Следует отметить, что в настоящее время в результате отсутствия систематизированных экспериментальных данных о динамике сглаживания шероховатости поверхности в зависимости от указанных выше факторов продолжительность обработки определяется опытным путем.

В работах [149, 206, 223, 231, 234–239] исследовалось влияние ЭИП на микротвердость поверхности сталей Ст3; 20; 30ХГСА; 08Х18Н10 и 12Х18Н10Т. Снижение микротвердости поверхности авторы работ [223, 231, 234–238] связывают с удалением наклепанного поверхностного слоя металла в процессе полирования. По

мнению авторов работ [149, 206, 231], снижение микротвердости возможно также в результате отпуска или отжига вследствие локального термического воздействия ПГО на тонкий поверхностный слой или снижения в поверхностном слое количества карбидов и карбонитридов вследствие их избирательного травления [224, 228–231]. Авторы работы [239], несмотря на то, что химический и фазовый составы поверхности стали Ст3 после 10 мин обработки не изменились, тем не менее, считают, что снижение микротвердости поверхности происходит в результате ее разупрочнения, вызванного рекристаллизационными процессами. Следует отметить, что при ЭИП стали Ст3 в течение 10 мин величина съема металла с поверхности составляет порядка 0,1 мм [90, 132, 222]. На наш взгляд, учитывая то, что образцы были изготовлены из листового проката в состоянии поставки, снижение микротвердости поверхности обусловлено удалением наклепанного поверхностного слоя металла. Ранее нами было установлено [233], что влияние ЭИП на микротвердость поверхностного слоя имеет более сложный характер.

Точность обработки. Для обеспечения точности обработки с заданным качеством поверхности еще на начальных этапах проектирования технологического процесса ЭИП следует учитывать ряд факторов, приведенных ниже.

В работах [152, 153, 223, 229, 234, 235, 238, 240] исследовалось влияние глубины погружения заготовки в электролит на величину съема металла. Авторы работ связывают повышение скорости съема при увеличении глубины погружения с ростом гидростатического давления, температурным градиентом в вертикальном направлении, турбулентным перемешиванием электролита вследствие образования и роста пузырьков пара и газа и их движения к поверхности электролита с переменной скоростью. Согласно [152], зависимость скорости съема металла от глубины погружения заготовки описывается линейной функцией, причем увеличение глубины погружения на каждые 100 мм вызывает повышение скорости съема на 10–14 %. Аналогичные результаты мы получили ранее [90].

Для снижения неравномерности съема металла по длине при ЭИП вертикально расположенной в электролите длинномерной заготовки в авторском свидетельстве [241] предлагается использовать пароотвод с перфорированным каркасом, расположенным коаксиально обрабатываемой заготовке. По мнению авторов, применение

пароотвода позволит в процессе обработки отвести избытки газообразных продуктов от обрабатываемой поверхности, в результате чего толщина ПГО вдоль обрабатываемой поверхности будет одинакова, а градиент гидростатического давления электролита по длине заготовки будет иметь минимальное значение. Однако с авторами полностью согласиться нельзя. Действительно, применение пароотвода будет способствовать удалению газообразных продуктов от поверхности заготовки, но не будет способствовать выравниванию гидростатического давления электролита по длине заготовки. Поскольку конструкция пароотвода обеспечивает свободный доступ электролита из общего объема ванны к поверхности заготовки, то гидростатическое давление электролита по длине заготовки будет различным.

В работах [152, 153, 223, 229, 240] экспериментально установлено влияние кривизны обрабатываемой поверхности на точность обработки вследствие различий в толщине ПГО в различных областях кривизны. Показано, что ЭИП выпуклых поверхностей приводит к увеличению съема металла в криволинейной области заготовки по сравнению с плоским участком, а ЭИП вогнутых поверхностей – к снижению. Теоретическое обоснование этого эффекта нами было дано ранее [242].

В авторском свидетельстве [243] отмечено, что точность и качество обработки заготовок сложной конфигурации можно повысить за счет изменения угла наклона катодов по отношению к криволинейным участкам поверхности заготовки и регулирования межэлектродного расстояния. Авторы изобретения, основываясь на опыте электрохимической размерной обработки и ЭХП, полагают, что при ЭИП за счет выбора угла наклона катодов и межэлектродного расстояния можно регулировать плотность электрического тока на поверхности заготовки. Авторы также утверждают, что для стабилизации процесса ЭИП необходимо создавать направленный снизу вверх принудительный ламинарный поток электролита, который исключит срыв ПГО около поверхности заготовки.

В патенте [244] для повышения точности обработки полых изделий за счет более равномерного съема металла предлагается вводить в обрабатываемую полость дополнительный вращающийся катод в виде стакана, в нижней части которого расположены отверстия. Вращение катода, по мнению авторов, обеспечит эффектив-

ную циркуляцию электролита в нижней области полости заготовки, а принудительная циркуляция электролита будет способствовать более равномерному теплоотводу от стенок полости, что позволит ликвидировать области локального перегрева электролита, обеспечить постоянную плотность тока и стабилизировать ПГО за счет центробежных сил.

Согласно [223, 245, 246], повысить точность и производительность обработки при ЭИП заготовок сложной конфигурации можно за счет придания заготовке дискретного или равномерного вращательного движения, а также качательного движения с переменной угловой скоростью. Эти движения, по мнению авторов, снижают негативное влияние неравномерности структуры ПГО на съем металла и обеспечивают более легкий отвод газообразных продуктов, что должно привести к более равномерному съему металла и сглаживанию шероховатости обрабатываемой поверхности. В работе [223] показано, что ЭИП может быть использовано не только для финишной обработки поверхности, но и в качестве формообразующей операции при обработке длинномерных деталей типа тел вращения малого диаметра. Так, при изготовлении ступенчатого ультразвукового волновода длиной 540 мм из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т на экспериментальной установке ЭИП, оснащенной приводами вращения и продольного перемещения заготовки, обеспечивается формообразование цилиндрических ступеней волновода $\varnothing 1,9$; 1,6 и 1,0 мм с отклонением от круглости на ступенях волновода не более 0,003–0,005 мм и шероховатостью поверхности Ra 0,08 мкм.

Таким образом, во многих работах отмечено, что при ЭИП на точность обработки существенное влияние оказывают самоорганизованное или принудительное движение электролита и его рассеивающая способность, под которой понимают степень равномерности распределения электрического тока на обрабатываемой поверхности. Однако влияние межэлектродного расстояния, геометрической формы электролитической ванны, расположения обрабатываемых заготовок относительно друг друга и относительно стенок ванны на точность обработки, несмотря на научно-практическую значимость этих факторов, до настоящего времени не исследовано. В конечном итоге, вследствие недостатка экспериментально обоснованных данных о рассеивающей способности электролита при ЭИП деталей с высокими требованиями к точности

размеров приходится использовать сложную технологическую оснастку, что значительно снижает производительность и повышает стоимость обработки.

Эксплуатационные характеристики поверхности деталей. Несмотря на широкое применение метода ЭИП в различных отраслях промышленности, до настоящего времени известны лишь ограниченные сведения о влиянии ЭИП на эксплуатационных характеристиках поверхности деталей. Так, в работе [149] приведены данные о контактном электрическом сопротивлении, коэффициенте трения и износостойкости поверхности стали 20 после ЭИП, ХП, ЭХП и механического полирования. Показано, что ЭИП обеспечивает минимальные значения контактного электрического сопротивления и коэффициента трения и максимальную износостойкость, которая оказалась выше на 22 и 32 % по сравнению соответственно с механически и электрохимически полированными поверхностями.

В работах [223, 234, 237, 238, 247] приведены результаты коррозионных испытаний аустенитных коррозионностойких сталей 08X18N10 и 12X18N10T в 0,9%-м водном растворе хлорида натрия. Исследовалось влияние концентрации и температуры электролита, глубины погружения образца, продолжительности ЭИП и микротвердости поверхности на потенциал коррозии. Авторы работ считают, что повышение коррозионной стойкости связано со снижением шероховатости и микротвердости поверхности, т.е. с повышением ее качества и удалением дефектного поверхностного слоя металла. Исследование влияния ЭИП на коррозионную стойкость поверхности других металлов и сплавов не проводилось.

Таким образом, исследование влияния ЭИП на эксплуатационные характеристики поверхности деталей из сплавов на основе железа, хрома и никеля имеет важное научно-практическое значение. Проведение комплексных экспериментальных исследований влияния ЭИП на такие эксплуатационные характеристики поверхности, как коррозионная стойкость, стойкость против межкристаллитной коррозии, коэффициент трения, адгезионную прочность гальванических и вакуумно-плазменных покрытий позволит значительно расширить область применения технологий ЭИП, номенклатуру обрабатываемых сплавов и повысить надежность деталей и узлов различного назначения.

1.3.2. Современные представления о механизме формирования профиля поверхности в условиях электроимпульсного полирования

Механизм формирования профиля поверхности при ЭИП включает в себя физические, химические, геометрические и технологические аспекты, которые, как правило, взаимосвязаны и на сегодняшний день мало изучены. В настоящее время существует несколько гипотез о механизме сглаживания неровностей поверхности в процессе ЭИП. Так, согласно [164], наиболее интенсивному эрозионному воздействию микроразрядов и активной газовой среды ПГО подвергаются выступы профиля поверхности. Поскольку поверхность во впадинах профиля, по мнению авторов, частично пассивирована, то поверхность впадин в меньшей степени подвержена эрозионному воздействию. При этом физическая природа микроразрядов в ПГО не раскрывается. Зеркальный блеск поверхности, согласно [164], обеспечивается при равенстве скоростей образования и растворения тончайшей оксидной пленки на обрабатываемой поверхности.

Авторы работ [132, 149] полагают, что в ПГО в результате электрического разряда возникает плазма, высокая температура которой приводит к испарению металла на вершинах выступов профиля. Согласно [149], снижение шероховатости поверхности происходит вследствие того, что поверхность электролита на границе с ПГО является предельно гладкой, а обрабатываемая поверхность стремится повторить рельеф поверхности электролита. В результате этого высота неровностей обрабатываемой поверхности стремится к минимуму.

Автор работы [206], опираясь на результаты экспериментальных исследований тепловых потоков, теоретического расчета теплового баланса процесса ЭИП и конечно-элементного моделирования распределения теплового поля при воздействии разряда на поверхность анода, считает, что под действием разряда в ПГО сглаживание шероховатости поверхности анода происходит в результате локальных испарений металла объемом $2,26 \cdot 10^{-2}$ – $4,02 \cdot 10^{-2}$ мкм³ на вершинах выступов поверхности. Однако в работе физическая природа разрядов в ПГО не раскрывается. В качестве подтверждения адекватности своей модели автор предоставил фотографию полированной

поверхности образца из стали 12Х18Н10Т, полученную с помощью атомно-силового микроскопа. На фрагменте поверхности размером 50x50 мкм имеется единственный вулканообразный выступ с кратером диаметром около 0,6–0,8 мкм. Однако нами было показано ранее [236] и в более поздних работах других авторов [231, 238], что этот дефект поверхности связан с селективным растворением структурных составляющих стали 12Х18Н10Т, непосредственно примыкающих к карбидной фазе, и последующим удалением карбида в раствор электролита.

По мнению авторов работы [148], при ЭИП сглаживание рельефа поверхности может обеспечиваться путем реализации двух механизмов. Во-первых, при температуре газа в ПГО около 100 °С высокая напряженность электрического поля способна вызвать ионизацию паров ПГО и эмиссию ионов и электронов, необходимых для поддержания стационарного тлеющего разряда в оболочке. Авторы полагают, что тлеющий разряд обеспечивает электрическую проводимость ПГО и вызывает ее свечение. При этом они полагают, что распределение напряженности электрического поля в ПГО точно соответствует форме рельефа обрабатываемой поверхности при максимальной напряженности поля на выступах рельефа, в результате чего выступы подвергаются воздействию искровых разрядов. В разрядах выделяется значительная энергия, что способствует сглаживанию вершин выступов. Во-вторых, сглаживание шероховатости поверхности возможно путем растворения неровностей по аналогии с ЭХП. В этом случае, по мнению авторов, на выступах обрабатываемой поверхности с большим градиентом напряженности электрического поля оксидная пленка разрушается тогда, когда отрывающие усилия, создаваемые электрическим полем, превысят прочность сцепления пассивной пленки с поверхностью. Авторы считают, что травление оксидной пленки происходит в первую очередь на выступах поверхности, где оксидный слой более тонкий.

Согласно [248], ПГО способствует протеканию на обрабатываемой поверхности интенсивных химических и электрохимических реакций, приводящих к анодному окислению поверхности. Авторы полагают, что разрушение оксидного слоя происходит в результате генерирования на поверхности анода множественных искровых разрядов, которые вследствие повышенной напряженности электрического поля происходят преимущественно на вершинах выступов не-

ровностей, в результате чего достигается высокая скорость сглаживания неровностей и исключается точечное травление поверхности.

По мнению авторов работ [153, 223, 247, 249], сглаживание шероховатости поверхности в условиях ЭИП происходит за счет двух основных механизмов, одновременно реализуемых на поверхности анода. Авторы считают, что первый механизм представляет собой процесс окисления поверхности анода в результате ее взаимодействия с ионами кислорода O^- и гидроксильными группами OH^- , присутствующими в ПГО. Мнения о втором механизме, предполагающем избирательное сглаживание окисленных выступов, у авторов работ различны. Так, согласно [153, 249], избирательное сглаживание происходит в результате воздействия на поверхность выступов импульсных и диффузных электрических разрядов. По мнению авторов работы [235], окисленные выступы поверхности сглаживаются под действием искровых и коронных разрядов. Иное мнение приведено в работах [223, 247]. Считается, что избирательное сглаживание окисленных выступов происходит в результате ионно-пучкового травления или ионного распыления оксидных слоев. Кроме того, предполагается, что электрические разряды сопровождаются микровзрывами, которые могут отрывать оксидный слой на вершинах выступов.

Отметим, что приведенные выше гипотезы о механизме сглаживания шероховатости поверхности в процессе ЭИП необоснованно базируются на основных закономерностях разрядных процессов и съема металла в условиях электролитного нагрева в катодном [250] и анодном [112, 221] режимах, электроэрозионной обработки [36] и ЭХП [35]. В общем случае они сводятся к тому, что напряженность электрического поля на вершинах выступов поверхности должна быть значительно выше по сравнению со впадинами, в результате чего возникновение разрядов наиболее вероятно на вершинах выступов. Кроме того, гипотезы ошибочно базируются на том факте, что на профилограмме реальной поверхности выступы имеют островершинный вид. На самом деле этот эффект связан с различием в масштабах вертикального и горизонтального увеличения профилограммы и показан на рис. 1.4 [251], из которого следует, что профиль реальной поверхности при одинаковых значениях вертикального и горизонтального увеличения имеет плавный, пологий вид.

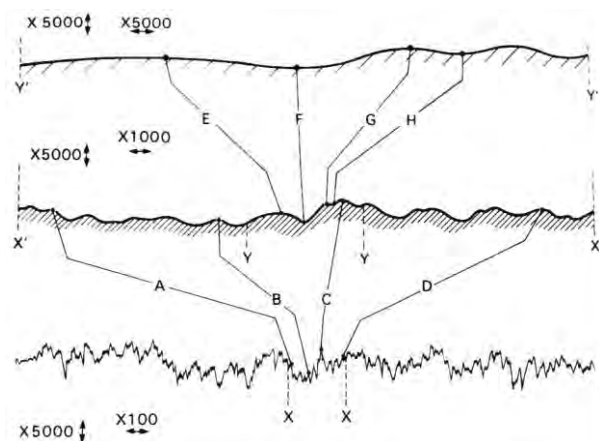


Рис. 1.4. Влияние горизонтального увеличения профилограммы на внешний вид профиля поверхности

Учитывая рис. 1.4 и тот факт, что ПГО представляет собой динамически устойчивую систему со средней толщиной, соизмеримой с высотой профиля поверхности [222, 223, 225], можно предположить, что пробой ПГО может происходить с равной вероятностью как на выступах, так и во впадинах профиля обрабатываемой поверхности в области случайных неоднородностей электрического поля. По этим причинам, а также в связи с отсутствием теоретического и экспериментального обоснования приведенных выше гипотез о механизме сглаживания шероховатости поверхности в условиях ЭИП адекватность предложенных гипотез вызывает сомнения.

Шероховатость поверхности является одной из основных геометрических характеристик качества поверхности деталей и оказывает значительное влияние на ее эксплуатационные характеристики [5, 11, 13]. По этой причине разработка теории формирования топографии в условиях ЭИП, учитывающей весь комплекс приведенных выше факторов, имеет важное научно-практическое значение.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Оборудование и технологическая оснастка для исследования процесса электроимпульсного полирования

Для проведения экспериментальных исследований процесса ЭИП была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, блок-схема которой представлена на рис. 2.1.

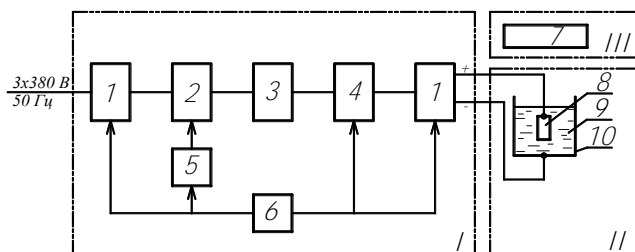


Рис. 2.1. Блок-схема экспериментальной установки:

- I – источник технологического тока, II – электролитическая ячейка,
- III – вытяжной шкаф, 7 – коммутатор, 2 – блок автотрансформаторов,
- 3 – выпрямитель, 4 – С-фильтр, 5 – электромеханический привод,
- 6 – блок управления и контроля, 7 – система вентиляции, 8 – образец,
- 9 – электролит, 10 – бак термостата

Функционально экспериментальная установка состоит из источника технологического тока I и электролитической ячейки II, расположенной в вытяжном шкафу III с прозрачным защитным экраном. Система вентиляции 7 предназначена для удаления водяного пара и газов из вытяжного шкафа.

Источник технологического тока мощностью 15 кВт построен на базе блока 2 из трех однофазных автотрансформаторов АОСН-20-220-75 УХЛ4, оснащенного электромеханическим приводом 5. С блока автотрансформаторов напряжение переменного тока подается на трехфазный двухполупериодный выпрямитель 3, собранный по схеме Ларионова на диодах ВЛ-200. На выходе выпрямителя включен С-фильтр 4 переменной емкости (0–4000 мкФ), предназначенный для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.

Напряжение постоянного тока, регулируемое в диапазоне от 0 до 550 В, подается на электролитическую ячейку. Блок управления и контроля *б* предназначен для коммутации источника технологического тока, задания и контроля величины напряжения постоянного тока, контроля силы постоянного тока, задания времени обработки и защиты источника технологического тока от перегрузок и коротких замыканий. Контроль величины напряжения и силы тока осуществляется с помощью вольтметра и амперметра постоянного тока М 330 класса точности 1,5. В экспериментах, в которых требовалось измерение точных значений напряжения и силы постоянного тока, на выходе источника технологического тока дополнительно подключались приборы М2038 класса точности 0,5.

Электролитическая ячейка выполнена на базе жидкостного лабораторного термостата СЖМЛ-19/2,5. Термостат состоит из блока управления и бака *10* прямоугольной формы объемом 19 дм³ с теплоизолированными стенками. Блок управления термостата позволяет в автоматическом режиме стабилизировать температуру термостатной жидкости в диапазоне от 30 до 250 °С с точностью до ±0,02 °С. Термостатная жидкость (в нашем случае электролит 9) заливается в бак термостата и нагревается двумя электрическими нагревателями общей мощностью 2 кВт. Перемешивание термостатной жидкости в баке термостата осуществляется встроенной мешалкой. Для большего отбора мощности в термостате предусмотрен охладитель, подключаемый к внешнему контуру системы охлаждения. При проведении экспериментов охладитель термостата подключался к водопроводной сети. Функцию задатчика температуры электролита выполнял контактный термометр ТПК №3-11-200 с диапазоном измерения от 0 до 100 °С и ценой деления 1 °С. Измерение и контроль температуры электролита осуществляли контрольным термометром ТЛ-2 №2 с диапазоном измерения от 0 до 100 °С и ценой деления 1 °С. При ЭИП образцов с площадью поверхности до 50 см² температура электролита в баке термостата поддерживалась с точностью не хуже ±1 °С в диапазоне значений от 40 до 95 °С. При изучении самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите, измерении толщины ПГО, определении рассеивающей способности электролита и равномерности съема металла использовались электролитические ячейки, конструктив-

ные особенности которых приведены в соответствующих методиках исследований.

2.2. Выбор объектов для исследования

Из широкой номенклатуры марок сплавов на основе железа, хрома и никеля объектами для исследования выбраны коррозионно-стойкие и низколегированные углеродистые стали. Выбор марок сталей основывался на необходимости выявления общих основных физико-химических и технологических закономерностей ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля и степени применимости этих сталей в машино- и приборостроении, в производстве изделий медицинского назначения, деталей и узлов энергетического и химического оборудования и товаров народного потребления.

Из группы коррозионностойких сталей выбраны аустенитная сталь 12Х18Н10Т и мартенситные стали 20Х13 и 40Х13 (ГОСТ 5632-72). Химический состав коррозионностойких сталей 12Х18Н10Т, 20Х13 и 40Х13 приведен в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав коррозионностойких сталей 12Х18Н10Т, 20Х13 и 40Х13 (ГОСТ 5632–72)

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %								
	C	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Ti
12Х18Н10Т	≤0,12	Осн.	17-19	9-11	≤2,0	≤0,8	≤0,035	≤0,02	0,6-0,8
20Х13	0,16-0,25	Осн.	12-14	-	≤0,8	≤0,8	≤0,03	≤0,025	-
40Х13	0,36-0,45	Осн.	12-14	-	≤0,8	≤0,8	≤0,03	≤0,025	-

Сталь 12Х18Н10Т является одной из самых распространенных марок коррозионностойких сталей и широко применяется в виде сортового проката и горячекатаного листа при изготовлении изде-

лий и сварных конструкций, работающих в контакте с азотной кислотой и другими окислительными средами, органическими растворителями и в атмосферных условиях. Сталь 20X13 широко используется для изготовления изделий, которые должны обладать достаточно высокой прочностью и одновременно достаточным запасом пластичности и ударной вязкости и подвергаются воздействию слабо агрессивных сред – атмосферы, водных растворов солей органических кислот при комнатной температуре, растворов азотной кислоты низкой и средней концентрации при умеренных температурах и т.п. Сталь 40X13 широко применяется для изготовления режущего, мерительного и хирургического инструментов, пружин, клапанных пластин компрессоров, предметов народного потребления.

Из группы низколегированных углеродистых сталей выбраны широко используемые в промышленности качественные конструкционные углеродистые стали 10; 20 и 35 (ГОСТ 1050-88) и инструментальная углеродистая сталь У8А (ГОСТ 1435-99). Химический состав конструкционных углеродистых сталей 10; 20 и 35 представлен в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Химический состав конструкционных углеродистых сталей 10; 20 и 35 (ГОСТ 1050–88)

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %								
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
10	0,07-0,14	0,17-0,37	0,35-0,65	≤0,3	≤0,04	≤0,035	≤0,15	≤0,3	≤0,08
20	0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	≤0,3	≤0,04	≤0,035	≤0,25	≤0,3	≤0,08
35	0,32-0,4	0,17-0,37	0,5-0,8	≤0,3	≤0,04	≤0,035	≤0,25	≤0,3	≤0,08

В машиностроении сталь 10 широко применяется в виде листового и сортового проката для изготовления деталей, от которых

требуется высокая пластичность и сохранение физико-механических свойств при температуре до +450 °С, деталей, подвергаемых химико-термической обработке для обеспечения высокой твердости и износостойкости поверхности, для изготовления электросварных и бесшовных холодно- и горячедеформированных труб и т.п. Сталь 20 используется для изготовления механически обработанных и штампованных деталей, работающих при температуре до +350 °С, деталей с высокими показателями твердости и износостойкости поверхности после химико-термической обработки (шестерни, червяки, винты и т.п.). Сталь 35 применяется для изготовления деталей невысокой прочности, испытывающих небольшие напряжения (оси, цилиндры, коленчатые валы, шатуны, шпиндели, звездочки, тяги, валы, диски и т.п.)

Инструментальная углеродистая сталь У8А широко используется для изготовления инструментов, работающих в условиях, не вызывающих разогрева режущей кромки: фрез, продольных и дисковых пил, накатных роликов, слесарного инструмента. Ее химический состав приведен в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Химический состав инструментальной углеродистой стали У8А (ГОСТ 1435–99)

Массовая доля химических элементов, %							
C	Si	Cu	Mn	Ni	P	Cr	S
0,75-0,84	0,17-0,33	≤0,2	0,17-0,33	≤0,2	≤0,03	≤0,2	≤0,018

Исследование основных физико-химических и технологических закономерностей процесса ЭИП проводилось с использованием водных растворов на основе сульфата и хлорида аммония, которые являются основными компонентами растворов электролита для ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля [90, 126, 141, 142, 157, 205, 222, 228]. При ЭИП коррозионностойких сталей использовался раствор сульфата аммония, при ЭИП низколегированных углеродистых сталей – раствор хлорида аммония.

2.3. Методы исследования

При проведении комплексного теоретического и экспериментального исследования использовались стандартные и общепринятые в технических науках методы исследований, а также новые, разработанные в соответствии с требованиями ГОСТ 8.010–90.

Исследование топографии, морфологии, микроструктуры, химического и фазового состава поверхности проводилось на сканирующих электронных микроскопах JSM-5610 LV с системой энергодисперсионного химического микроанализа EDX JED-2201 (JEOL, Япония) и Mira (Tescan, Чехия) с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром Inca 350 (Oxford Instruments, Великобритания), на электронном спектрометре ЭС-2401 (СССР), рентгеновском дифрактометре ДРОН 3,0 (СССР) и оптических микроскопах Neophot-21 (Carl Zeiss, Германия) и МКИ-2М-1 (Планар, Беларусь).

Измерение параметров шероховатости поверхности и запись профилограмм производились на профилометрах-профилографах мод. 252 (СССР), M2 (Mahr, Германия) и Talysurf-5 (Rank Taylor Hobson, Англия) в соответствии с требованиями ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 25142–82. Запись круглограмм и измерение волнистости и отклонения от круглости поверхности образцов производились на измерительной системе Talirond-73 (Rank Taylor Hobson, Англия).

Измерение линейных и диаметральных размеров образцов производилось штангенциркулем ШЦ-11-125-0,1 с точностью $\pm 0,05$ мм и микрометром МК 0-25-0,01 с точностью $\pm 0,005$ мм. Масса образцов определялась путем взвешивания на аналитических весах ВЛР-200 (СССР) с точностью $\pm 0,00005$ г. Исследование склонности коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т к межкристаллитной коррозии проводилось методом АМУ по ГОСТ 6032-89 с учетом требований ГОСТ 14019–2003. Сквозная пористость вакуумно-плазменного покрытия TiN определялась методом индикаторных паст по ГОСТ 9.302–88.

Измерение величины показателя концентрации водородных ионов (рН) растворов электролита выполнялось потенциометрическим методом с использованием рН-метра-милливольтметра рН-150 (СССР), у которого предел допускаемой абсолютной погрешности при измерении величины рН составляет $\pm 0,05$. В качестве измерительного электрода использовался стеклянный электрод марки

ЭСЛ-15-11, в качестве вспомогательного – насыщенный хлорсеребряный электрод сравнения марки ЭВЛ-1М4.

Описание новых методик исследований приведено ниже.

2.3.1. Методика исследования самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите

ЭИП образцов проводилось в стеклянной кубической электролитической ячейке размером 400х400х400 мм (рис. 2.2) в 6%-м водном растворе сульфата аммония при температуре раствора 75–80 °С и напряжении обработки 300±5 В [252].

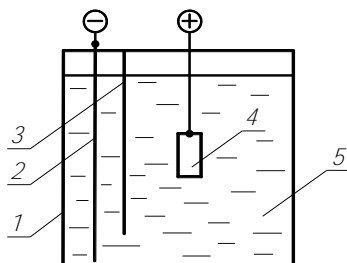


Рис. 2.2. Схема электролитической ячейки:
1 – корпус ячейки, 2 – катод, 3 – диэлектрическая перегородка,
4 – образец (анод), 5 – электролит

Образец 4 из стали 12X18H10T в виде плоской пластины размером 40х30х4 мм, цилиндра Ø5х40 мм или шара Ø15 мм располагался в электролите 5 на вертикальной оси ячейки 1 на расстоянии 100 мм от зеркала электролита. Плоский катод 2 располагался вертикально вдоль одной из стенок ячейки. Для снижения возможного влияния потоков, вызванных движением ионов раствора в электрическом поле, на общую картину самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите катод отделялся от общего объема электролита сплошной диэлектрической перегородкой 3, установленной вертикально на расстоянии 10 мм от дна ячейки.

Для выявления самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите в раствор вводилась мелкодисперсная диэлектрическая химически нейтральная присадка, обладавшая плавучестью.

Визуальное наблюдение за потоками осуществлялось через боковые поверхности электролитической ячейки. Общая картина движения потоков фиксировалась цифровой видеокамерой DCR-НС 42Е (SONY, Япония) после выхода системы «электролит–ПГО–образец» в квазистационарное состояние, при котором гидродинамические потоки в электролите приобретали установившееся движение.

2.3.2. Методика исследования амплитудных, частотных и спектральных характеристик электрического тока в парогазовой оболочке при анодном процессе

Исследование амплитудных, частотных и спектральных характеристик электрического тока в ПГО [253–257] проводилось на экспериментальной установке, блок-схема которой представлена на рис. 2.3.

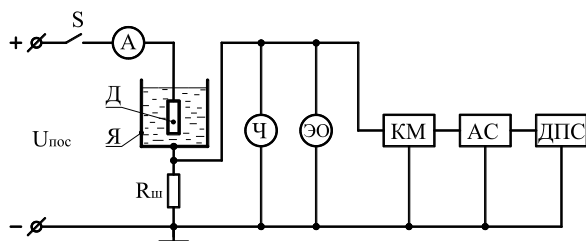


Рис. 2.3. Блок-схема экспериментальной установки

Напряжение постоянного тока $U_{\text{пос}}=125\text{--}400\text{ В}$ подавалось между цилиндрическим образцом Д и корпусом термостатированной электролитической ячейки Я через выключатель S, амперметр постоянного тока А (М2038, класс точности 0,5) и шунт $R_{\text{ш}}$ (75 ШС 20 А, класс точности 0,5). Образец Д диаметром 8 мм, изготовленный из стали 20Х13 и изолированный с двух торцов фторопластом, размещался в электролите вертикально на оси ячейки на расстоянии 100 мм от зеркала электролита, в качестве которого использовался 5%-й водный раствор сульфата аммония.

Сигнал электрического тока, выделенный на мало индуктивном шунте $R_{\text{ш}}$, подавался по коаксиальным кабелям на электронный частотомер Ч (ЧЗ-34), электронный запоминающий осциллограф ЭО (С8-13) и кассетный магнитофон КМ. В процессе обработки полу-

ченных данных сигнал тока с выхода магнитофона КМ подавался на гетеродинный анализатор спектра АС (СК4-56), с выхода которого он поступал на самопишущий потенциометр ДПС (Н307). Самопишущий потенциометр ДПС применялся для графической фиксации спектра электрического тока в ПГО. Частотомер Ч использовался для измерения частоты высокочастотной составляющей электрического тока. Осциллограммы тока, полученные на экране запоминающего осциллографа ЭО, фиксировались цифровой фотокамерой DSC-H5 (SONY, Япония).

2.3.3. Методика измерения толщины парогозовой оболочки

ПГО представляет собой динамически устойчивую систему со средней толщиной около 10^{-4} – 10^{-6} мм [112, 205, 223, 225, 258]. По этой причине измерение толщины ПГО с помощью измерительного зонда значительно затруднено и имеет большую погрешность, т.к. структура ПГО искажается при введении в нее измерительного зонда. Данные, полученные с помощью этого метода, дают лишь приблизительную оценку толщины ПГО.

Для измерения толщины ПГО использовалась методика [259] и устройство [260, 261], схема которого представлена на рис. 2.4. При измерении толщины ПГО с помощью этого устройства принято допущение о том, что единичный электрический пробой воздушного промежутка между металлическим анодом и электролитным катодом при характерных для процесса ЭИП напряжениях обработки аналогичен пробую ПГО одним электролитным мостиком.

Электролитическая ячейка выполнена в виде двух диэлектрических цилиндрических сообщающихся сосудов разного диаметра. Она имеет расширительную 2 и измерительную 9 ячейки, соединенные между собой трубкой 5. На дне измерительной ячейки расположен катод 7. Измерительная ячейка расположена в термостатирующей ячейке 6, выполненной на базе термостата СЖМЛ – 19/2,5 – И1, что позволяет исследовать электрический разряд при различных температурах электролита, в том числе при температурах, близких к температуре кипения электролита. Подъем уровня электролита в измерительной ячейке осуществляется за счет подачи электролита в расширительную ячейку с помощью дозатора

электролита 1. Тонкое регулирование уровня электролита в измерительной ячейке осуществляется дозатором 4.

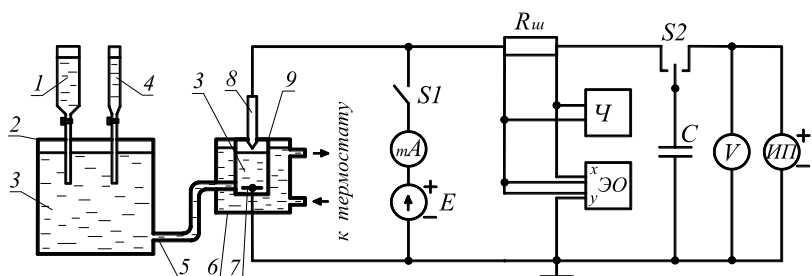


Рис. 2.4. Схема устройства для измерения толщины ПГО:
 1; 4 – дозаторы электролита, 2 – расширительная ячейка, 3 – электролит,
 5 – трубка, 6 – термостатирующая ячейка; 7 – катод, 8 – анод,
 9 – измерительная ячейка

Устройство работает следующим образом. Анод 8, нижняя часть которого может иметь различную форму и размеры, подводится на расстояние 0,5–1 мм до поверхности электролита 3, находящегося в измерительной ячейке 9. Переключателем S_2 конденсатор C подключается к источнику технологического тока ИП и заряжается до рабочего напряжения, величина которого контролируется электронным вольтметром V (ВЗ-55). После зарядки конденсатор C переключателем S_2 подключается к разрядной цепи. При плавном подъеме уровня электролита в измерительной ячейке за счет подачи электролита дозатором 1 в расширительную ячейку на некотором расстоянии между анодом 8 и электролитом 3 наступает электрический пробой воздушного промежутка. Ток электрического разряда протекает через мало индуктивный шунт $R_{ш}$ (75 ШС 20 А; 75 мВ, класс точности 0,5). Электронный частотомер Ч (ЧЗ-34) и запоминающий осциллограф ЭО (С8-17) предназначены для исследования электрических характеристик разряда.

После прекращения разряда воздушный промежуток между анодом и поверхностью электролита восстанавливается. Для измерения его величины к разрядной цепи переключателем S_1 подключается источник ЭДС E низкого напряжения (1–10 В). С помощью дозатора 4 уровень электролита в измерительной ячейке 9 плавно подни-

мают до соприкосновения с анодом. В момент касания электролита с анодом в измерительной цепи возникает электрический ток, который регистрируется миллиамперметром *mA* (М2038, класс точности 0,5). Зная объем электролита, дополнительно введенного дозатором 4 в расширительную ячейку 2, величину воздушного разрядного промежутка рассчитывают по формуле [261]

$$l = \frac{4V}{\pi(d_1^2 + d_2^2)}, \quad (2.1)$$

где l – величина воздушного разрядного промежутка, мм; V – объем дополнительно введенного в расширительную ячейку электролита, мм³; d_1 – внутренний диаметр расширительной ячейки, мм; d_2 – внутренний диаметр измерительной ячейки, мм.

При изготовлении электролитической ячейки были использованы сосуды с внутренними диаметрами $d_1=367$ мм и $d_2=70$ мм. Дозирование электролита дозаторами 1 и 4 осуществлялось с точностью соответственно 100 и 10 мм³. При проведении измерений на электролитическую ячейку подавалось напряжение 300 В, а ячейка предохранялась от внешних воздействий – циркуляции воздуха и вибраций. В качестве электролита использовался 1,5%-й водный раствор хлорида натрия. Численная оценка, произведенная по (2.1), показала, что при принятых значениях конструктивных элементов электролитической ячейки устройство позволяет измерять воздушные промежутки между анодом и поверхностью электролита с точностью $\pm 0,045$ мкм.

2.3.4. Методики исследования рассеивающей способности электролита, выхода металла по току, точности и производительности обработки

Для электрохимических методов обработки обеспечение точности является одной из сложнейших задач [44, 45, 83, 84]. Съем металла на различных участках поверхности заготовки сложной конфигурации напрямую связан с пространственно-временной эпюрой локальных скоростей анодного растворения металла. В общем случае равномерность съема металла определяется равномерностью распределения электрического тока на различных участках обраба-

тываемой поверхности. При электрохимической обработке на распределение электрического тока оказывает влияние ряд трудно учитываемых факторов, в частности, расположение электродов относительно друг друга и относительно стенок электролитической ячейки, форма и размер электродов и ячейки, величина поляризации электродов, электропроводность электролита, гидродинамические явления в электролите и другие [3, 8, 44, 45, 262, 263].

Для оценки равномерности распределения электрического тока на поверхности электродов существует несколько методов, которые можно объединить в три группы:

1. Графические методы [262], основанные на исследовании поляризации электродов. Основной недостаток этих методов заключается в сложности снятия воспроизводимых кривых поляризации.

2. Методы построения электрического поля [262], сущность которых заключается в том, что в результате измерений потенциалов в различных точках электролитической ячейки строится электрическое поле в виде графика распределения эквипотенциальных и силовых линий. Эти методы характеризуются большой трудоемкостью и не обеспечивают достоверной воспроизводимости результатов.

3. Методы, основанные на исследовании непосредственно распределения тока на поверхности электродов [262, 263]. В настоящее время они получили наибольшее научно-практическое применение.

Для исследования распределения электрического поля в электролите в условиях ЭИП использовалось устройство, схема которого представлена на рис. 2.5 [260]. Оно включает набор датчиков $E1-E_N$ и запоминающее устройство, выполненное на базе конденсаторов $C1-CN$ небольшой емкости (0,1 мкФ) и диодных ключей $VD1-VDN$. При подаче на электролитическую ячейку напряжения обработки между анодом 4 и катодом 1 в электролите 2 возникает электрический ток, приводящий к образованию ПГО 3 и перераспределению электрических потенциалов в электролите. После установления стабильной ПГО переключателем S к катоду подключались конденсаторы $C1-CN$ через диодные ключи $VD1-VDN$. После зарядки конденсаторы отключались от катода и выключался источник тока. Электрические потенциалы, характерные для каждой исследуемой точки в электролите $E1-E_N$, измерялись в контрольно-измерительных точках $K1-KN$ высокоомным электронным вольт-

метром ВЗ-55. Величина потенциалов корректировалась на величину падения напряжения на диодах $VD1-VDN$.

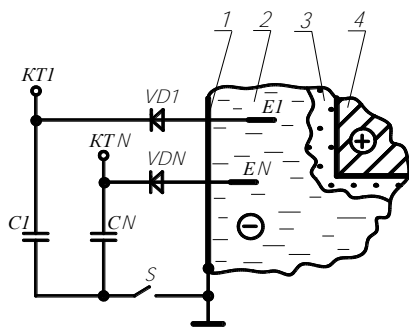


Рис. 2.5. Схема устройства для исследования объемного распределения электрических потенциалов в ванне ЭИП (фрагмент):
1 – катод, 2 – электролит, 3 – ПГО, 4 – анод

Исследование равномерности распределения электрического тока на поверхности анода в условиях ЭИП выполнялось по методике определения рассеивающей способности электролита [264–266] с учетом рекомендаций, приведенных в [262, 263]. Термин "рассеивающая способность электролита" означает способность электролита перераспределять электрический ток в электролитической ячейке в зависимости от ее геометрии, состава и физико-механических свойств электролита и режима электролиза. Для анодной обработки рассеивающая способность характеризует равномерность съема металла с обрабатываемой поверхности и точность получаемых размеров.

Электрический ток, проходя через электролит, на своем пути от катода до различных участков поверхности анода встречает неодинаковое электрическое сопротивление R , которое в общем случае можно представить в виде равенства

$$R = R_{\text{перех}} + R_{\text{эл}} + R_{\text{мет}}, \quad (2.2)$$

где $R_{\text{перех}}$ – переходное сопротивление на границе раздела фаз «электрод–электролит», равное сумме переходных сопротивлений

на границах раздела фаз «катод–электролит» $R_{\text{перех}}^{\text{к}}$ и «электролит–анод» $R_{\text{перех}}^{\text{а}}$; $R_{\text{эл}}$ – сопротивление электролита; $R_{\text{мет}}$ – суммарное сопротивление металлических электродов (анода и катода), которое можно не учитывать ввиду его пренебрежительно малой величины по сравнению с остальными слагаемыми в (2.2).

В зависимости от соотношения $R_{\text{перех}}$ и $R_{\text{эл}}$ возможно два граничных случая распределения тока на поверхности электродов [25, 44]:

1. При $R_{\text{эл}} \gg R_{\text{перех}}$ равномерность распределения тока минимальна и определяется в основном величиной межэлектродного расстояния;

2. При $R_{\text{эл}} \ll R_{\text{перех}}$ различия в межэлектродных расстояниях не оказывают существенного влияния на равномерность распределения тока на поверхности электродов.

Для ЭИП в качестве переходного сопротивления на границе раздела фаз «электролит–анод» $R_{\text{перех}}^{\text{а}}$ примем электрическое сопротивление ПГО. Численная оценка удельного сопротивления ПГО, выполненная по данным, приведенным в монографиях [112, 205], дает величину $\approx 500\text{--}2000 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. Следовательно, с учетом того, что растворы электролита для ЭИП обладают высокой электропроводностью ($\kappa \geq 0,05\text{--}0,06 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$) [112, 205], а отношение $R_{\text{перех}}^{\text{а}}/R_{\text{перех}}^{\text{к}} \gg 100$, слагаемыми $R_{\text{перех}}^{\text{к}}$ и $R_{\text{эл}}$ в (2.2) можно пренебречь. Тогда равенство (2.2) примет вид

$$R \approx R_{\text{перех}}^{\text{а}} = R_{\text{ПГО}}, \quad (2.3)$$

где $R_{\text{ПГО}}$ – сопротивление ПГО.

Учитывая общую электрохимическую природу процессов ЭИП и ЭХП и необходимость сравнительного анализа полученных данных, исследование влияния геометрических факторов обработки (формы и размеров электролитической ячейки и электродов, расположения электродов относительно друг друга и относительно стенок ячейки) на рассеивающую способность электролита и точность обработки наружных цилиндрических поверхностей выполнялось для обоих процессов с использованием устройства, схема которого представлена на рис. 2.6 [265, 266].

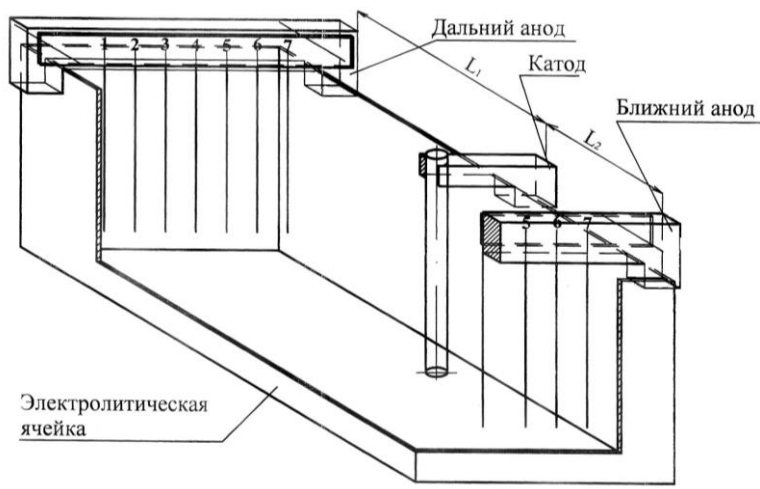


Рис. 2.6. Схема устройства для определения рассеивающей способности электролита:
1–7 – секции разборного анода

На продольной оси электролитической ячейки из диэлектрического материала размером 1000(Д) \times 250(Ш) \times 200(В) мм в электролите вертикально размещался цилиндрический катод $\text{Ø}20 \times 100$ мм из стали 12Х18Н10Т. По обе стороны катода на расстояниях $L_1=250 \pm 1$ мм и $L_2=50 \pm 1$ мм перпендикулярно продольной оси ячейки в электролите вертикально размещались два разборных анода – дальний и ближний. Каждый разборный анод состоял из семи секций. В качестве секций разборных анодов использовались цилиндрические образцы размером $\text{Ø}1,5 \times 100$ мм из стали 12Х18Н10Т. Расстояние между секциями в разборных анодах составляло 25 ± 1 мм. ЭИП проводилось в течение $10 \pm 0,05$ мин при напряжении обработки 310 ± 5 В и температуре электролита 80 ± 2 °С. В качестве электролита использовался 5%-й водный раствор сульфата аммония. Химический состав раствора электролита и режимы ЭИП приведены в табл. 2.4 [267].

До и после обработки образцы промывались в дистиллированной воде и сушились фильтровальной бумагой, после чего взвешивались на аналитических весах ВЛР-200 с точностью $\pm 0,00005$ г. Диаметральные размеры образцов измерялись микрометром

МК 0-25-0,01, линейные – штангенциркулем ШЦ-11-125-0,1. Рассеивающая способность электролита рассчитывалась по формуле [263]

$$T = \frac{K - M_6 / M_d}{K - 1} \cdot 100 \%, \quad (2.4)$$

где T – рассеивающая способность электролита, %; K – коэффициент, равный отношению L_1/L_2 (рис. 2.6); M_6 ; M_d – средний удельный съем металла с поверхности соответственно ближнего и дальнего анодов, $\text{мг}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$.

Таблица 2.4 – Состав раствора электролита и режимы ЭХП

Наименование параметров	Значение параметра
Состав раствора электролита, масс. %:	
• H_3PO_4	70
• H_2SO_4	20
• H_2O	10
Режим электролиза:	
• плотность электрического тока, $\text{А}/\text{дм}^2$	70
• температура электролита, $^\circ\text{C}$	80
• продолжительность обработки, мин	5

Удельный съем металла с поверхности каждой секции разборных анодов рассчитывался по формуле

$$M_i = \frac{P_0^i - P_1^i}{S_i \cdot \tau}, \quad (2.5)$$

где M_i – удельный съем металла с поверхности i -й секции, $\text{мг}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$; P_0^i ; P_1^i – масса i -й секции разборных анодов соответственно до и после обработки, мг ; S_i – площадь обрабатываемой поверхности i -й секции разборных анодов, см^2 ; τ – продолжительность обработки, мин .

Средний удельный съем металла с поверхности ближнего M_6 и дальнего M_d разборных анодов рассчитывался по формулам

$$M_6 = \frac{\sum_{i=1}^7 M_i^6}{7}, \quad M_d = \frac{\sum_{i=1}^7 M_i^d}{7},$$

где M_i^b – удельный съем металла с поверхности i -й секции ближнего анода, $\text{мг}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$; M_i^d – удельный съем металла с поверхности i -й секции дальнего анода, $\text{мг}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$; 7 – количество секций в разборных анодах.

Следует отметить, что для электрохимических методов обработки при исследовании рассеивающей способности электролитов одним из основных требований является необходимость учета геометрических факторов обработки, поскольку полученные результаты могут иметь частные значения, корректные только для электролитической ячейки определенной геометрической формы и размеров [262]. По этой причине при исследовании влияния геометрических факторов обработки на рассеивающую способность электролита в условиях ЭИП был дополнительно проведен эксперимент в цилиндрической электролитической ячейке размером $\text{Ø}400 \times 350$ мм, аналогичный описанному выше.

Влияние распределения силовых линий электрического поля в электролитической ячейке на равномерность съема металла с обрабатываемой поверхности исследовалось по методике, приведенной в [265, 266]. Сущность методики заключается в том, что в электролитической ячейке, представленной на рис. 2.6, размещался один разборный анод вдоль продольной оси ячейки перпендикулярно плоскому катоду на расстоянии $L_1 = 270 \pm 1$ мм от катода до первой секции разборного анода (рис. 2.7). Расстояние между секциями разборного анода составляло 50 ± 1 мм. Величина съема металла на сторону на секциях разборного анода рассчитывалась по формуле

$$G_i = \frac{P_0^i - P_1^i}{S_i \cdot \rho}, \quad (2.6)$$

где G_i – съем металла на сторону с поверхности i -й секции разборного анода, мм ; P_0^i ; P_1^i – масса i -й секции разборного анода соответственно до и после обработки, г ; S_i – площадь обрабатываемой поверхности i -й секции разборного анода, мм^2 ; ρ – плотность стали 12Х18Н10Т, $\text{г}/\text{мм}^3$ (принята равной $7,9 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{мм}^3$).

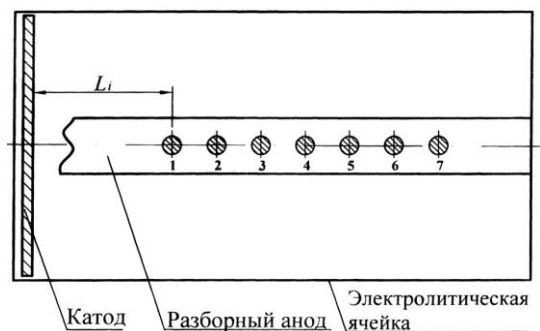


Рис. 2.7. Схема устройства для исследования равномерности съема металла:
1–7 – секции разборного анода

Сравнительный анализ точности обработки методами ЭИП и ЭХП производился с помощью круглограмм, по которым определялись волнистость и отклонение от круглости поверхности образцов. Обработка проводилась по схеме, представленной на рис. 2.7. В этом случае разборный анод состоял из двух цилиндрических шлифованных образцов из стали 12Х18Н10Т размером $\text{Ø}4 \times 60$ мм, расположенных на расстоянии от катода до ближнего и дальнего образцов соответственно равном 270 ± 1 и 570 ± 1 мм.

Снятие круглограмм и измерение волнистости и отклонения от круглости поверхности проводилось на измерительной системе Talirond-73 (Rank Taylor Hobson, Англия) в пяти сечениях для каждого образца с шагом 10 мм, начиная от нижнего торца образца. Измерение отклонений от круглости производилось путем прецизионного вращения измерительного преобразователя прибора относительно поверхности образца последовательно в каждом сечении. Вокруг полученного реального профиля поверхности прибор автоматически описывал мнимую прилегающую окружность, относительно которой производилось измерение отклонения от круглости как наибольшего расстояния от точек реального профиля поверхности образца до мнимой прилегающей окружности с точностью $\pm 0,05$ мкм.

Производительность обработки при ЭИП оценивалась по величине удельного съема металла с поверхности образца, которая рассчитывалась по (2.5), и величине съема металла на сторону, которая рассчитывалась по (2.6). При выполнении расчетов плотность ста-

лей 10; 20 и 35 принята равной $7,85 \cdot 10^{-3}$ г/мм³, сталей 20Х13 и 40Х13 – соответственно $7,67 \cdot 10^{-3}$ г/мм³ и $7,65 \cdot 10^{-3}$ г/мм³.

При исследовании механизма анодного растворения сплавов на основе железа, хрома и никеля использовалось понятие “выход металла по току” [268]. Выход металла по току характеризует ту долю от общего количества электричества, прошедшего через электролитическую ячейку, которая затрачивается непосредственно на электрохимическое растворение металла, и рассчитывается по формуле [45]

$$ВТ_{Me} = \frac{\Delta m_{\text{эксп}}}{\Delta m_{\text{теор}}} \cdot 100 \%, \quad (2.7)$$

где $ВТ_{Me}$ – выход металла по току, %; $\Delta m_{\text{эксп}}$ – экспериментально установленное изменение массы образца, г; $\Delta m_{\text{теор}}$ – теоретически рассчитанное изменение массы образца, г.

В результате совместного решения уравнений, описывающих первый и второй законы Фарадея [41, 45], получено выражение для теоретического расчета массы анодно-растворенного металла $\Delta m_{\text{теор}}$

$$\Delta m_{\text{теор}} = q_{Me} \cdot I \cdot \tau, \quad (2.8)$$

где q_{Me} – электрохимический эквивалент металла, г/А·ч; I – сила тока в электролитической ячейке, А; τ – продолжительность ЭИП, ч.

Значения электрохимических эквивалентов q_{Me} для ряда металлов с учетом различной степени их окисления приведены в справочной литературе. После подстановки (2.8) в (2.7) получено выражение для расчета значения выхода металла по току

$$ВТ_{Me} = \frac{\Delta m_{\text{эксп}}}{q_{Me} \cdot I \cdot \tau} \cdot 100 \%. \quad (2.9)$$

Экспериментально установленное изменение массы образца $\Delta m_{\text{эксп}}$ рассчитывалось по формуле

$$\Delta m_{\text{эксп}} = m_0 - m_1,$$

где m_0 ; m_1 – масса образца соответственно до и после ЭИП в течение τ , г.

В связи с тем, что для коррозионностойких сталей 12X18H10T, 20X13 и 40X13 точное определение их электрохимических эквивалентов затруднено в связи с большим содержанием легирующих элементов (15,655–33,655 % без учета углерода, табл. 2.1), характеризующихся различным электрохимическим поведением, что может привести к большой погрешности при расчете величины выхода металла по току, в качестве объектов для исследования выбраны низколегированные углеродистые стали 10; 20; 35 и У8А в состоянии поставки, у которых содержание легирующих элементов без учета углерода составляет 1,308–2,175 % (табл. 2.2 и 2.3). При проведении экспериментов использовались цилиндрические образцы размером $\varnothing 8,5 \times 30$ мм с экранированными фторопластом торцами. Часть образцов из стали У8А (HRC_s , 64–65) предварительно подверглась закалке в масле при $T_{\text{зак}}=780$ °С с последующим отпуском при $T_{\text{отп}}=170$ °С [219]. ЭИП образцов проводилось в водном растворе хлорида аммония в течение $3 \pm 0,05$ мин. Напряжение обработки поддерживалось с точностью ± 5 В, температура электролита – с точностью ± 1 °С. До и после ЭИП образцы промывались в дистиллированной воде, сушились фильтровальной бумагой и взвешивались на аналитических весах ВЛР-200 с точностью $\pm 0,00005$ г. Сила электрического тока в электролитической ячейке измерялась амперметром постоянного тока М2038 класса точности 0,5.

2.3.5. Методики исследования геометрических параметров качества и блеска поверхности

Для количественной оценки шероховатости поверхности в соответствии с ГОСТ 2789–73 используются следующие параметры, измеренные в пределах базовой длины: Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, Rz – высота неровностей профиля по десяти точкам, $Rmax$ – наибольшая высота неровностей профиля, t_p – относительная опорная длина профиля, Sm – средний шаг неровностей профиля и S – средний шаг местных выступов профиля. В мировой практике для контроля и анализа структуры шероховатости поверхности используются как перечисленные выше, так и дополнитель-

ные параметры, которые в соответствии с ГОСТ 25142–82 [269] подразделяются на три группы:

1. Параметры шероховатости, связанные с высотными свойствами неровностей профиля поверхности, которые характеризуются исключительно высотой выступа или глубиной впадины профиля или тем и другим вместе независимо от горизонтального расположения выступов.

2. Параметры шероховатости, связанные со свойствами неровностей в направлении длины профиля, которые определяются только расстоянием между неровностями на поверхности.

3. Параметры шероховатости, связанные с формой неровностей профиля поверхности, которые характеризуются как амплитудой, так и формой и расположением выступов.

К наиболее часто используемым параметрам из первой и второй групп относятся [251]: Ra , Rq – среднее квадратическое отклонение профиля, Rz , $Rmax$, Rp – высота наибольшего выступа профиля, Sm , S и HSC – количество выступов профиля над линией, проведенной эквидистантно средней линии профиля на расстоянии $0,1Rp$. Дополнительную информацию о структуре шероховатости поверхности дают параметры из третьей группы [251]: Δq – средний квадратический наклон профиля и λq – средняя квадратическая длина волны профиля.

При изучении динамики изменения параметров шероховатости и механизма формирования профиля поверхности в процессе ЭИП обработке подвергались плоские образцы размером 40x20x3 мм из конструкционной углеродистой стали 10 и коррозионностойкой стали 20X13 [270–276]. Шероховатость исходной поверхности образцов обеспечивалась шлифованием на плоскошлифовальном станке мод. ОШ 224 Н до уровня Ra 1,4–0,33 мкм, который обычно задается в производственных условиях перед операцией полирования. Образцы обрабатывались при напряжении 300 ± 5 В в течение от 1 до 15 мин. Продолжительность обработки выдерживалась с точностью $\pm 0,05$ мин. Температура электролита изменялась дискретно в диапазоне от 65 до 85 °С с шагом 5 °С и поддерживалась с точностью ± 1 °С. На профилографе-профилометре Talysurf-5 (Rank Taylor Hobson, Англия) снимались профилограммы поверхности образцов и измерялись следующие параметры шероховатости: Ra , Rq , Rz , Rp , $Rmax$, Sm , HSC , Δq и λq .

В качестве критерия для оценки эффективности сглаживания неровностей профиля принято относительное сглаживание шероховатости поверхности, которое рассчитывалось по формуле [35]

$$\Delta Ra = \frac{Ra^{\text{нач}} - Ra^{\text{кон}}}{Ra^{\text{нач}}} \cdot 100\%, \quad (2.10)$$

где ΔRa – относительное сглаживание шероховатости поверхности, %; $Ra^{\text{нач}}$, $Ra^{\text{кон}}$ – среднее арифметическое отклонение профиля соответственно исходной (шлифованной) поверхности образца и поверхности, обработанной в течение заданного времени, мкм.

Влияние ЭИП на блеск поверхности исследовалось на плоских образцах из конструкционной углеродистой стали 10 и коррозионностойкой стали 20X13 размером 60x40x3 мм в видимой области спектра фотоэлектрическим методом измерения неэлектрических величин в соответствии с ГОСТ 896-75 [277]. Образцы обрабатывались при напряжении 300 ± 5 В и температуре электролита 65 и 85 °С, которая поддерживалась с точностью ± 1 °С. Продолжительность обработки, заданная в диапазоне от 1 до 15 мин, выдерживалась с точностью $\pm 0,05$ мин. В качестве электролита использовался 2%-й водный раствор хлорида аммония при ЭИП стали 10 и 6%-й водный раствор сульфата аммония при ЭИП стали 20X13. Величина блеска определялась с помощью фотоэлектрического блескомера ФБ-2 по бескомпенсационной схеме при геометрии освещения–наблюдения светового потока 45°/45°. Принцип работы прибора заключается в следующем. В зависимости от уровня блеска изменяется интенсивность света, отраженного от исследуемой поверхности. Фототок, возникающий в результате освещения фотоэлемента и вызывающий падение напряжения на нагрузочном резисторе класса точности 0,2, измеряется микроамперметром М136А класса точности 0,5. Нагрузочный резистор и микроамперметр М136А, шкала которого отградуирована в процентах с ценой деления 1 %, являются составными частями прибора ФБ-2. Величина блеска определялась на разных участках поверхности образца. За результат испытания принималось среднее арифметическое значение трех измерений, расхождение между которыми не превышало 2 %. Блескомер ФБ-2 обеспечивает измерение величины блеска с погрешностью не более 4 %.

2.3.6. Вероятностно-статистический метод исследования механизма формирования профиля поверхности в процессе электроимпульсного полирования

Известно [251, 278], что в структуру шероховатости обработанной поверхности входят как закономерно, так и случайно расположенные неровности. Систематическая составляющая профиля обусловлена факторами, постоянно действующими в процессе обработки, и представляет собой основные неровности, которые на поверхности расположены определенным, закономерным образом. Случайная составляющая образуется в результате воздействия различных нерегулярных технологических и физических факторов и накладывается на поверхность основных неровностей профиля [251, 278]. Она имеет вероятностный характер и является реализацией случайной стационарной функции. Поэтому реальный профиль поверхности, полученный в результате ее обработки различными методами, представляет собой композицию систематической и случайной составляющих и описывается уравнением вида [278]

$$x(t) = x_{\beta}(t) + x_{\gamma}(t),$$

где $x_{\beta}(t)$ – периодическая функция; $x_{\gamma}(t)$ – нормальный эргодический стационарный процесс со средним значением равным нулю.

За периодическую функцию нами принята модель вида [278]

$$x_{\beta}(t) = A \cos(\omega t + \psi),$$

где A – детерминированная величина; ψ – случайная величина, равномерно распределенная на интервале $[0; 2\pi]$; ω – циклическая частота.

Для описания непрерывного в среднем квадратичном случайного стационарного процесса можно использовать корреляционную функцию вида [278]

$$K(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda\tau} dF(\lambda),$$

где $K(\tau)$ – корреляционная функция случайного стационарного процесса; $F(\lambda)$ – спектральная функция процесса $x_\gamma(t)$; τ – разница аргументов процесса; λ – частота спектра.

Для статистической оценки корреляционной функции можно использовать уравнение [279]

$$\widehat{K}(\tau) = \frac{1}{n-\tau} \sum_{i=1}^{n-\tau} (y_i - \bar{y})(y_{i+\tau} - \bar{y}), \quad (2.11)$$

где $\widehat{K}(\tau)$ – статистическая оценка корреляционной функции $K(\tau)$; n – количество измеренных точек реализации процесса; y_i – ордината i -ой точки; $y_{i+\tau}$ – ордината $i+\tau$ точки; \bar{y} – среднее арифметическое значение измеренных ординат.

Если спектральная функция $F(\lambda)$ абсолютно непрерывна, то ее можно представить в виде [278]

$$F(\lambda) = \int_{-\infty}^{\lambda} s(\lambda) d\lambda,$$

где $s(\lambda)$ – спектральная плотность процесса $x_\gamma(t)$.

Если известна корреляционная функция $K(\tau)$, то спектральная плотность $s(\lambda)$ может быть найдена по формуле [278]

$$s(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\lambda} e^{-i\lambda\tau} K(\tau) d\tau.$$

При реализации стационарного процесса на конечном интервале $[-L; L]$ статистической оценкой $\hat{s}(\lambda)$ спектральной плотности $s(\lambda)$ будет функция вида [278]

$$\hat{s}(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L e^{-i\lambda\tau} \widehat{K}(\tau) d\tau. \quad (2.12)$$

Структурная формула корреляционной функции, учитывающая систематическую и случайную составляющие, имеет вид [280]

$$K(\tau) = K_\beta(\tau) + K_\gamma(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n A_i^2 \cos \frac{2\pi}{T_i} \tau + K_\gamma(\tau),$$

где $K_\beta(\tau)$ – корреляционная функция систематической составляющей профиля поверхности; $K_\gamma(\tau)$ – корреляционная функция случайной составляющей профиля; A_i – амплитуда i -ой гармоники профиля; T_i – период i -ой гармоники профиля.

Поскольку коррелограмма профиля поверхности, содержащего систематическую и случайную составляющие, является композицией коррелограмм систематической и случайной составляющих, то она позволяет получать характеристики как совокупного профиля, так и отдельно периодической и случайной составляющих [280]. Из того, что в корреляционной функции систематической составляющей $K_\beta(\tau)$ амплитуды гармоник возводятся в квадрат, следует, что коррелограмма выделяет наиболее мощные гармоники профиля поверхности. При необходимости анализа маломощных гармоник профиля из корреляционного преобразования следует исключить наиболее мощную систематическую гармонику, приняв ее в качестве линии отсчета ординат профиля [281].

При анализе доли случайной составляющей в реальном профиле поверхности использовался коэффициент случайности профиля, который определялся по формуле [280]

$$\gamma = \frac{Rq_\gamma^2}{Rq^2}, \quad (2.13)$$

где γ – коэффициент случайности профиля поверхности; Rq – среднее квадратическое отклонение профиля; Rq_γ – среднее квадратическое отклонение случайной составляющей профиля.

При исследовании механизма формирования профиля поверхности в процессе ЭИП вероятностно-статистическим методом в качестве объектов для исследования выбрана конструкционная углеродистая сталь 10 и коррозионностойкая сталь 20X13 в виде плоских образцов размером 40x20x3 мм [282, 283]. Поверхность образцов предварительно шлифовалась на плоскошлифовальном станке мод. ОШ 224 Н до уровней Ra 1,3–1,4 мкм и Ra 0,53–0,63 мкм. Образцы из стали 10 полировались в 2%-м водном растворе хлорида аммония, из стали 20X13 – в 6%-м водном растворе сульфата аммония при напряжении обработки 300 ± 5 В и температуре электролита 85 ± 1 °С. Продолжительность обработки задавалась в диапазоне

от 1 до 15 мин и выдерживалась с точностью $\pm 0,05$ мин. До и после ЭИП на профилографах-профилометрах мод. 252 (СССР) и Talysurf-5 (Rank Taylor Hobson, Англия) снимались профилограммы поверхности и измерялся параметр шероховатости Ra . На приборе Talysurf-5 дополнительно измерялся параметр Rq .

Для автоматизированной компьютерной обработки профилограммы предварительно переводились в цифровой формат путем сканирования. С полученных оцифрованных изображений в программе Paint.NET v.3.35 удалялись линии сетки профилограмм и артефакты изображений. В результате, на оцифрованном изображении профилограммы оставалась только характерная для данного образца линия профиля поверхности. Для математической обработки полученных изображений и построения графиков использовался программный пакет MATLAB [284] и написанная в нем программа. Импортрование оцифрованных изображений профиля поверхности производилось с помощью Image Processing Toolbox пакета MATLAB. В результате, изображение профиля поверхности трансформировалось в матрицу, размеры которой были равны размеру изображения в пикселях. Значения элементов матрицы соответствовали цвету пикселя: для черного цвета, т.е. для точек на линии профилограммы «0», для белого цвета, т.е. для фона профилограммы «1». На рис. 2.8 в качестве примера представлено оцифрованное изображение диагонали квадрата и соответствующая ему матрица.

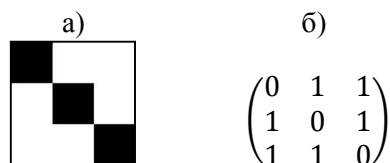


Рис. 2.8. Пример представления оцифрованного изображения диагонали квадрата (а) в матричном виде (б)

На точность расчетов параметров исследуемого профиля поверхности и построения коррелограмм, спектрограмм и сглаженных гистограмм большое влияние оказывает выбор линии для отсчета ординат профиля [280]. Для выделения из профилограммы собственно шероховатости и исключения влияния на точность расчетов

волнистости и макроотклонений поверхности в зависимости от внешнего вида линии профиля поверхности в качестве линии для отсчета ординат профиля принималась либо горизонтальная прямая линия, параллельная направлению продольного перемещения шупа профилографа, либо наклонная прямая линия, либо сплайн, либо линия, описываемая совокупностью гармонических функций. Коэффициенты в уравнении наклонной прямой линии определялись по методу наименьших квадратов с помощью функции Polyfit пакета MATLAB. При построении сглаживающего сплайна использовался тип аппроксимации Smoothing Spline пакета MATLAB. Для описания линии отсчета совокупностью гармонических функций использовался тип приближения Fourier пакета MATLAB – приближение данных отрезками ряда Фурье для $1 \leq n \leq 8$. Для последних двух методов параметры, влияющие на точность приближения, подбирались индивидуально для каждой профилограммы до приближения значения параметра Ra , рассчитанного по коррелограмме, к величине Ra , измеренной профилометром. По полученным матрицам производился отсчет ординат профиля поверхности относительно выбранных линий отсчета и рассчитывались значения корреляционной функции, спектральной плотности, сглаженной гистограммы профиля и параметра Ra . По результатам расчетов строились коррелограммы, спектрограммы и сглаженные гистограммы профиля.

Построение коррелограмм профиля поверхностей выполнялось по методике, приведенной в [285]. Расчет значений корреляционной функции производили по формуле (2.11), преобразованной для обработки профилограмм [281]

$$K(\tau) = K_{\beta}(\tau) + K_{\gamma}(\tau) = \frac{1}{l-\tau} \sum_0^{l-\tau} (y(x) - m_y) \cdot (y(x + \tau) - m_y). \quad (2.14)$$

где τ – аргумент корреляционной функции (разность между абсциссами двух сечений профилограммы), мкм; l – длина профилограммы, мкм; $y(x)$ – ордината точки x на профилограмме в выбранной системе координат, мкм; $y(x + \tau)$ – ордината точки $x + \tau$ на профилограмме в выбранной системе координат, мкм; m_y – среднее арифметическое значение ординат точек профилограммы, которое рассчитывалось по формуле

$$m_y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i(x)}{n},$$

где $y_i(x)$ – ордината i -й точки на профилограмме в выбранной системе координат, мкм; n – количество измеренных ординат точек профиля.

Значения τ принимались равными $0; \Delta x; 2\Delta x; \dots; n\Delta x$, где Δx представляет собой выбранный интервал на оси абсцисс профилограммы. В нашем случае принято $\Delta x = 1$ пиксель. Размер одного пикселя равен 84,67 мкм.

Спектральная плотность является функцией, описывающей распределение дисперсии неровностей профиля поверхности по частотам. Она показывает, какого рода неровности преобладают в исследуемом профиле. По сравнению с коррелограммой ее основным достоинством является наглядность [280]. Спектральная плотность $s(\omega)$ профиля поверхности представляет собой сумму спектральных плотностей систематической $s_\beta(\omega)$ и случайной $s_\gamma(\omega)$ составляющих профиля поверхности. При построении спектрограмм расчет значений спектральной плотности выполнялся по формуле (2.12), преобразованной для обработки профилограмм [281]

$$s(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_0^{2l/3} K(\tau) \cdot \cos(\omega\tau), \quad (2.15)$$

где $K(\tau)$ – значение корреляционной функции в точке с абсциссой τ ; ω – частота неровностей в точке с абсциссой τ , определяемая как

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

где T – период неровностей в точке с абсциссой τ , мкм.

При расчете значений спектральной плотности шаг изменения τ и T принят равным шагу изменения τ , принятому при расчете коррелограмм.

Аппроксимация построенных коррелограмм производилась с помощью Curve Fitting Tool пакета MATLAB функцией, позволяющей учесть систематические неровности как с большим, так и с малым шагом и имеющей вид [285]

$$K(\tau) = c^2 Ra^2 \left[\gamma e^{-\alpha\tau} + \beta \cos \frac{2\pi}{T_\beta} \tau + \nu \cos \frac{2\pi}{T_\nu} \tau \right], \quad (2.16)$$

где α – коэффициент частотного состава случайных неровностей поверхности; β – коэффициент высот систематических неровностей с периодом T_β ; ν – коэффициент высот систематических неровностей с периодом T_ν ; c – коэффициент, зависящий от формы неровностей и закона их распределения по высоте.

Коэффициент α определяет частотный состав случайных неровностей – чем меньше значение α , тем плавнее случайные неровности и тем больше расстояние между ними [280]. Коэффициенты γ , β и ν характеризуют вклад, вносимый соответствующими составляющими шероховатости поверхности в Ra^2 , причем $\gamma + \beta + \nu = 1$. По соотношению этих коэффициентов можно судить о характере неровностей поверхности, а по динамике изменения T_β , T_ν , α , γ , β и ν – о механизме формирования профиля поверхности в процессе ЭИП.

На точность аппроксимации коррелограмм большое значение оказывает выбор границ изменения параметров, который проводился на основе анализа коррелограмм и спектрограмм поверхностей. По коррелограмме рассчитывались границы изменения параметров β и γ . За ориентировочные значения брались отношения $K_\beta(0)$ и $K_\gamma(0)$ к $K(0)$. С помощью спектрограммы определялись значения шагов, которые соответствовали двум наибольшим пикам. Меньший шаг характеризует высокочастотные, а больший шаг – низкочастотные гармоники систематических неровностей профиля [285].

Из (2.16) следует, что корреляционная функция $K(\tau)$ при $\tau = 0$ связана с параметром шероховатости поверхности Ra выражением

$$K(0) = c^2 Ra^2. \quad (2.17)$$

С учетом [278], разрешения оцифрованных изображений и вертикального увеличения профилограмм математическое ожидание параметра шероховатости Ra рассчитывалось по преобразованной формуле (2.17)

$$ERa = \frac{\sqrt{2K(0)} \cdot 10^6}{\sqrt{\pi} \cdot R \cdot BV},$$

где ERa – математическое ожидание параметра шероховатости Ra , мкм; $K(0)$ – значение корреляционной функции при $\tau=0$; R – разрешение оцифрованного изображения профилограммы, m^{-1} , ($R = 11811 m^{-1}$); VU – вертикальное увеличение профилограммы.

После введения в программу численных данных производился расчет математического ожидания параметра Ra и параметров аппроксимации коррелограмм с доверительной вероятностью 95 %.

2.3.7. Методики исследования морфологии, микроструктуры, химического и фазового состава поверхности

Изучение морфологии и определение элементного химического состава поверхности выполнялось с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV, оснащенного системой энергодисперсионного химического микроанализа EDX JED-2201 (JEOL, Япония). Наличие двух типов детекторов позволяет получать изображения в режимах вторичных и обратно отраженных электронов с разрешающей способностью 3–4,5 нм и увеличением от 18 до 300000 крат. Система химического микроанализа EDX JED-2201 позволяет производить одновременный автоматический рентгеновский энергодисперсионный химический анализ поверхности исследуемого объекта на наличие химических элементов от B (бор) до U (уран) с концентрацией от 0,1 до 100 ат.%. Исследование морфологии и элементного химического состава поверхности проводилось в режиме отраженных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ и увеличениях от 100 до 5000 крат на плоских образцах размером 30x20x4 мм из конструкционной углеродистой стали 20 и коррозионностойкой стали 20X13 в состоянии поставки [286]. Образцы предварительно шлифовались на плоскошлифовальном станке мод. ОШ 224Н на чистовых режимах. ЭИП образцов выполнялось на режимах, приведенных в разделе 2.3.5 при температуре электролита $80 \pm 5^\circ C$. Для приготовления растворов электролита использовалась дистиллированная вода и химические реактивы квалификации ХЧ. После полирования образцы промывались в дистиллированной воде и сушились фильтровальной бумагой.

Для изучения морфологии поверхности в нанометровом диапазоне использовался атомно-силовой микроскоп НТ-206 (Микротест-машины, Беларусь) в режиме «Топография», имеющий вертикальное

и горизонтальное разрешение соответственно равное 0,2 и 2 нм, со стандартными кремниевыми кантилеверами (зондами) с радиусом закругления 10 мкм (MicroMasch Co, Россия).

Химический состав поверхности коррозионностойких сталей 12X18H10T и 20X13 исследовался методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) [287, 288], который основан на явлении фотоэлектрического эффекта при использовании монохроматического рентгеновского излучения и позволяет определять энергии электронных уровней на основании измеренных кинетических энергий фотоэлектронов [289]. С помощью РФЭС можно без разрушения образца качественно и количественно исследовать поверхность твердых тел, в том числе адсорбированные на ней молекулы. Глубина выхода фотоэлектронов из поверхности не превышает 5 нм, поэтому метод позволяет изучать сверхтонкий поверхностный слой. Исследование выполнялось на электронном спектрометре ЭС-2401 (СССР), который позволяет анализировать энергии связи электронов в диапазоне от 0 до 1500 эВ с погрешностью, не превышающей 0,1 эВ, и определять наличие элементов и химических соединений, находящихся в сверхтонких поверхностных слоях (до 20 Å) в количестве большем 0,1 ат.%. Снятие фотоэлектронных спектров производилось в вакууме при остаточном давлении в камере энергоанализатора $1 \cdot 10^{-7}$ Па в MgK_{α} монохроматическом излучении. Идентификация молекул на исследуемой поверхности проводилась на основании полученных спектров с помощью корреляционных таблиц [289], химических элементов – по таблицам энергии связи электронов [290]. Количественный анализ химического состава поверхности основан на прямой пропорциональной зависимости интенсивности линии на спектре и концентрации химического элемента или молекулы на исследуемой поверхности. Плоские образцы размером $\varnothing 10 \times 2$ мм обрабатывались методом ЭИП в течение $5 \pm 0,05$ мин. Режимы обработки и составы растворов электролита приведены в табл. 2.5 и 2.6. Для приготовления растворов использовалась дистиллированная вода и химические реактивы квалификации ХЧ. После полирования образцы промывались в дистиллированной воде и сушились фильтровальной бумагой. Температура растворов электролита поддерживалась с точностью ± 1 °С, напряжение обработки – с точностью ± 5 В.

Таблица 2.5 – Состав растворов электролита и режимы ЭИП образцов из стали 20X13

Номер образца	Состав электролита	Концентрация электролита*, масс. %	Температура электролита, °С	Напряжение обработки, В
1**	–	–	–	–
2	Сульфат аммония	4	70	250
3	Сульфат аммония	4	70	300
4	Сульфат аммония	4	70	450
5	Сульфат аммония Лимонная кислота	4 0,5	70	250
6	Сульфат аммония Лимонная кислота	4 0,5	70	300
7	Сульфат аммония Лимонная кислота	4 0,5	70	450

Примечания: 1 – * вода остальное; 2 – ** образец-свидетель после механического полирования.

Таблица 2.6 – Состав электролита и режимы ЭИП образцов из стали 12X18Н10Т

Номер образца	Состав электролита	Концентрация электролита*, масс. %	Температура электролита, °С	Напряжение обработки, В
8**	–	–	–	–
9	Сульфат аммония	4	70	250
10	Сульфат аммония	4	70	450
11	Сульфат аммония Лимонная кислота	4 0,5	70	250
12	Сульфат аммония Лимонная кислота	4 0,5	70	450

Примечания: 1 – * вода остальное; 2 – ** образец-свидетель после механического полирования.

Микроструктура поверхности коррозионностойких сталей 12X18Н10Т и 20X13 изучалась оптическим методом на микроскопе Neophot-21 (Carl Zeiss, Германия) при увеличении 500 и 800 крат с использованием методик цветного избирательного химического и

электрохимического травления поверхности образцов и избирательного травления составляющих структуры сталей. Исследование фазового состава проводилось на образцах размером $\varnothing 10 \times 2$ мм рентгеновским методом на рентгеновском дифрактометре ДРОН 3,0 в CoK_α для стали 12X18H10T и в CuK_α для стали 20X13 монохроматических излучениях [270, 291, 292]. Подготовка образцов производилась аналогичным образом, как при исследовании химического состава поверхности методом РФЭС.

2.3.8. Методика определения твердости тонкого поверхностного слоя

Исследование влияния ЭИП на твердость тонкого поверхностного слоя проводилось по методике косо́го шлифа на плоских образцах размером $30 \times 20 \times 4$ мм из низколегированных углеродистых сталей 20 и У8А и коррозионнотойкой стали 40X13 [293]. Составы растворов электролита и режимы ЭИП приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7 – Составы растворов электролита и режимы ЭИП

Наименование показателя	Марка стали	
	Сталь 20 и У8А	Сталь 40X13
Составы электролитов, масс. %:		
• хлорид аммония	1,5	–
• сульфат аммония	–	4,5
• вода	98,5	95,5
Режим ЭИП:		
• температура электролита, °С	70±1	70±1
• напряжение обработки, В	300±5	300±5
• продолжительность обработки, мин	8	8

Схема косо́го шлифа и расчетная схема для определения расстояния в сечении, нормальном к поверхности образца, представлены на рис. 2.9. Согласно расчетной схеме (рис. 2.9, б), в принятой системе координат XOY расстояние OX_i на поверхности шлифа связано с расстоянием OY_i в нормальном к поверхности образца сечении выражением

$$Ox_i = Oy_i / \sin \alpha,$$

где Ox_i – расстояние до i -й точки на поверхности шлифа, мкм; Oy_i – расстояние до проекции i -й точки на ось Oy , мкм; α – угол, под которым расположена поверхность косого шлифа по отношению к поверхности образца, градус.

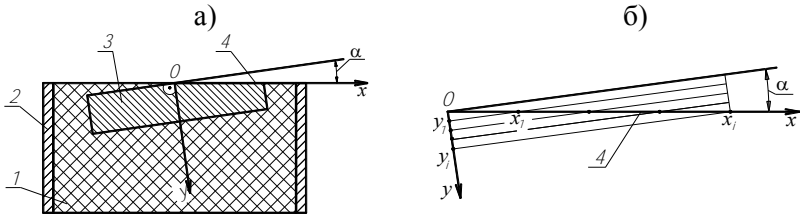


Рис. 2.9. Схема косого шлифа (а) и расчетная схема (б) для определения расстояния в нормальном к поверхности образца сечении:
1 – компаунд, 2 – обечайка, 3 – образец, 4 – поверхность шлифа

Измерение микротвердости производилось с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке на алмазную пирамиду 0,98 Н в соответствии с требованиями ГОСТ 9450–76. Использование методики косого шлифа при принятом значении угла $\alpha = 1^\circ 55'$ позволило в 30 раз увеличить протяженность исследуемой области образца, снизить трудоемкость и повысить точность измерений микротвердости в нормальном к поверхности образца сечении. При цене деления барабанчика окулярного микрометра прибора ПМТ-3 равной 0,000315 мм и принятой нагрузке на алмазную пирамиду с углом при вершине 136° погрешность измерения микротвердости не превышает 3,5 %.

2.3.9. Методики исследования коррозионной стойкости и склонности к межкристаллитной коррозии

Коррозионные испытания металлов и сплавов в общем случае делятся на полевые, натурные и лабораторные [43, 294]. Для решения ряда прикладных задач наибольшее распространение получили лабораторные коррозионные испытания, которые проводят в искус-

ственно созданных и тщательно контролируемых условиях. Лабораторные испытания позволяют получать достаточно хорошо воспроизводимые данные и с их помощью можно определить степень влияния отдельных факторов на развитие коррозионного процесса.

Для изучения влияния ЭИП на коррозионную стойкость поверхности сплавов на основе железа, хрома и никеля из широкого ряда лабораторных испытаний выбрано два метода: метод изменения массы образца и метод снятия поляризационных кривых. Определение коррозионной стойкости по методу изменения массы образца является наиболее простым и надежным, т.к. непосредственно определяется количество металла, разрушенного коррозией. Метод снятия поляризационных кривых, которые можно проводить гальваностатическим или потенциостатическим способами, позволяет судить о том, с какой скоростью протекают электрохимические реакции, и заключается в изучении зависимости скорости электрохимических реакций от потенциала металла и от внешней поляризации [294].

В качестве объектов для лабораторных коррозионных испытаний выбрана конструкционная углеродистая сталь 10 и коррозионно-стойкая сталь 20Х13 [295]. Для сопоставления и анализа результатов коррозионным испытаниям подвергались шлифованные, электрохимически и электроимпульсно полированные плоские образцы размером 30×20×3 мм с шероховатостью поверхности соответственно Ra 0,36; 0,16 и 0,12 мкм. Шероховатость поверхности шлифованных образцов обеспечивалась обработкой на плоскошлифовальном станке мод. ОШ 224Н на режимах тонкого шлифования. Образцы перед ЭХП и ЭИП шлифовались на чистовых режимах. ЭИП образцов из стали 10 проводилось в течение 5 мин в 2%-м водном растворе хлорида аммония, из стали 20Х13 – в течение 15 мин в 6%-м водном растворе сульфата аммония при напряжении обработки 310±5 В и температуре электролита 80±1 °С. Состав растворов электролита и режимы ЭХП приведены в табл. 2.8 [267].

Перед коррозионными испытаниями с помощью штангенциркуля ШЦ-11-125-0,1 и микрометра МК 0-25-0,01 измерялись размеры образцов и рассчитывались площади их поверхности, после чего образцы химически обезжиривались, травились, промывались в питьевой воде, сушились фильтровальной бумагой и взвешивались на аналитических весах ВЛР-200 с точностью ±0,00005 г.

Таблица 2.8 – Состав растворов электролита и режимы ЭХП

Наименование показателей	Марка стали	
	Сталь 10	Сталь 20X13
Состав раствора электролита, масс. %:		
• H_3PO_4	70	45
• H_2SO_4	15	25
• CrO_3	5	4
• H_2O	10	26
Режим электролиза:		
• плотность тока, А/дм ²	50	50
• температура электролита, °С	70	80
• продолжительность обработки, мин	5	5

При определении коррозионной стойкости по методу изменения массы образца в качестве коррозионной среды использовался 3%-й водный раствор хлорида натрия из расчета 30–50 см³ на 1 см² поверхности образца в соответствии с требованиями ГОСТ 9.308-85 и ГОСТ 9.012-73. Образцы выдерживались в растворе в течение 24 ч при температуре раствора 20±2 °С. После испытаний образцы промывались в питьевой воде, с поверхности удалялись продукты коррозии, после чего образцы сушились и взвешивались. Продукты коррозии с поверхности образцов из стали 10 удалялись в течение 30–40 мин в водном растворе, содержащем 50 г/л NaOH и 200 г/л Zn-гранулированного, при температуре раствора 85±5 °С, из стали 20X13 – течение 20 мин в водном растворе, содержащем 100 мл/л HNO₃, при температуре раствора 65±5 °С. По изменению массы образца рассчитывались коррозионные потери массы по формуле [294]

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{S}, \quad (2.18)$$

где Δm – коррозионные потери массы образца, г/м²; m_0 ; m_1 – масса образца соответственно до и после испытания, г; S – площадь поверхности образца до испытания, м².

Скорость коррозии рассчитывалась по формуле [294]

$$K_m = \frac{\Delta m}{\tau \cdot S}, \quad (2.19)$$

где K_m – скорость коррозии, г/м²·ч; τ – продолжительность испытания, ч.

В отличие от метода изменения массы образца, дающего усредненное значение скорости коррозии за 24 ч испытаний, метод снятия поляризационных кривых позволяет не только количественно рассчитать скорость коррозии в конкретный момент времени, но и получить сведения о характере коррозионного процесса. Для исследования коррозионной стойкости путем снятия поляризационных кривых выбран потенциостатический метод, который имеет ряд преимуществ по сравнению с гальваностатическим методом, поскольку позволяет изучать зависимость скорости растворения металла от внешнего потенциала в широкой области потенциалов, в том числе и в области, соответствующей переходу металла из активного состояния в пассивное и наоборот [294].

Снятие поляризационных кривых проводилось на образце-электроде площадью 1 см² в 3%-м водном растворе хлорида натрия с помощью потенциостата ПИ-50-1.1, имеющего точность измерения по току $\pm 0,2$ %, по напряжению ± 5 мВ, в комплекте с программатором ПР-8. Электродом сравнения служил насыщенный хлорсеребряный электрод сравнения марки ЭВЛ-1М1, вспомогательным электродом – платиновый электрод марки ЭПВ-1. Исследуемые образцы выдерживались в растворе в течение 5–15 мин до установления стационарного потенциала, после чего для снятия катодной поляризационной кривой производилось смещение потенциала образца-электрода в сторону отрицательных значений на величину 25–30 мВ путем внешней поляризации. Значения тока записывались через каждые 1–2 мин. Затем ячейка отключалась и образец-электрод выдерживался в растворе до установления стационарного или близкого к нему потенциала, после чего, сдвигая потенциал в сторону положительных значений, аналогичным образом снимали анодную поляризационную кривую.

Определение стойкости коррозионнстойкой стали 12Х18Н10Т к межкристаллитной коррозии проводилось методом АМУ по ГОСТ 6032-84 с учетом рекомендаций ГОСТ 14019-2003 [296]. Два образца, предварительно шлифованные до Ra 0,8 мкм, сваривались между собой аргонодуговой сваркой. Сварной образец имел размеры 80х20х3 мм. Затем сварные образцы в соответствии с требованиями ГОСТ 6032-84 подвергали закалке при температуре нагрева 1050–

1100 °С с охлаждением в воде [219]. После термообработки сварные образцы полировали методом ЭИП на режимах, приведенных в разделе 2.3.5.

2.3.10. Методика определения адгезионной прочности гальванических и тонкопленочных вакуумно-плазменных покрытий

В разделе 1.2.1 показано, что ЭИП широко используется для подготовки поверхности изделий перед нанесением гальванических и тонкопленочных вакуумно-плазменных покрытий, для которых прочность сцепления с подложкой (адгезионная прочность покрытия) является одной из основных характеристик качества.

Влияние ЭИП подложки на адгезионную прочность гальванических покрытий исследовалось для гальванического блестящего хромового покрытия (твердый хром), нанесенного на подложку из конструкционной углеродистой стали 10 размером 30×20×3 мм [297, 298]. Предварительно шлифованные образцы до Ra 1,25 мкм полировались в течение от 1 до 7 мин при напряжении обработки 310±5 В в 2%-м водном растворе хлорида аммония при температуре 80±1 °С. Исходя из экспериментальных данных, приведенных в [222, 239, 271–273], максимальная продолжительность ЭИП подложки была ограничена 7 мин. После ЭИП на поверхность образцов наносилось хромовое покрытие толщиной 10±0,5 мкм на режимах, приведенных в [263].

Влияние ЭИП подложки на адгезионную прочность, сквозную пористость и шероховатость поверхности тонкопленочных вакуумно-плазменных покрытий исследовалось для TiN покрытия, нанесенного на подложки из коррозионностойкой стали 12X18H10T размером 25×10×4 мм [299–303]. Предварительно шлифованные образцы до Ra 1,44 и 0,41 мкм полировались в течение от 1 до 20 мин при напряжении обработки 300±5 В в 5%-м водном растворе сульфата аммония при температуре раствора 80±1 °С. После ЭИП на вакуумной установке УРМЗ 279. 048, дополнительно оснащенной импульсным генератором и системой газонапуска с плавной регулировкой, производилось напыление вакуумно-плазменного покрытия TiN толщиной до 3 мкм. Принятые технологические ре-

жимы нанесения покрытия позволили максимально снизить вероятность попадания капельной фазы на поверхность подложки.

Адгезионная прочность покрытий определялась на приборе LSRH (Leybold Heraeus, Германия) по методике царапания покрытия индентором в виде алмазного конуса Роквелла с радиусом вершины 0,2 мм [304]. Сущность методики заключается в том, что нагруженный индентор проводится по плоской поверхности с покрытием, а действующая на индентор сила после каждого прохода индентора дискретно увеличивается вплоть до начала отслаивания покрытия от подложки. Контакт индентора с покрытием приводит к деформации исследуемого покрытия и вызывает напряжения в покрытии и в металле подложки. Область, расположенная непосредственно под острием алмаза, находится в сжатом состоянии, в то время как область покрытия, прилегающая к индентору, находится в напряженном состоянии с максимальным напряжением на краю поверхности контакта индентора с покрытием. Критическая нагрузка, приводящая к отслоению покрытия, достигается тогда, когда напряжение на периферии поверхности контакта достигает величины прочности сцепления покрытия с металлом подложки [305, 306]. Для определения критической нагрузки на поверхности образцов с TiN и Cr покрытиями наносилась сетка параллельных царапин длиной 5–7 мм. Скорость движения образца относительно индентора составляла 10 мм/мин.

При исследовании адгезионной прочности TiN покрытия нагрузка на индентор для каждой последующей царапины увеличивалась с 10 до 80 Н с шагом 5 Н. Нагружение индентора производилось путем размещения грузов на уравновешенном рычаге. После испытания поверхность образца изучалась под микроскопом МКИ-2М-1 (Планар, Беларусь) при увеличении 125 крат. В качестве критической нагрузки принималась нагрузка, при которой происходило полное или частичное отслаивание TiN покрытия от подложки.

При исследовании адгезионной прочности гальванического хромового покрытия нагрузка на индентор для каждой последующей царапины увеличивалась с 15 до 25 Н с шагом 1 Н. Исследование структуры царапин на поверхности покрытия проводилось на электронном сканирующем микроскопе Mira (Tescan, Чехия) с разрешением 30 Å, оснащенный рентгеновским энергодисперсионным спектрометром Inca 350 (Oxford Instruments, Великобритания) [297, 298].

Морфология поверхности исследовалась в режиме отраженных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ и увеличениях от 1000 до 10000 крат. Спектрометр Inca 350 позволяет регистрировать рентгеновское излучение элементов, начиная с В (бор), и производить их количественный анализ с погрешностью 3–5 %. Использование микрорентгеноспектрального анализа позволило корректно определить критическую нагрузку, при которой происходит разрушение всего хромового покрытия, а не только его верхнего слоя.

Адгезионная прочность тонкопленочного вакуумно-плазменного TiN покрытия рассчитывалась по формуле [304]

$$\sigma_A = k \frac{1}{\sqrt{\pi R}} \sqrt{W_c \cdot H}, \quad (2.20)$$

где σ_A – адгезионная прочность покрытия, МПа; R – радиус вершины индентора, мм; W_c – наблюдаемая критическая нагрузка, Н; H – твердость покрытия, МПа; k – коэффициент Вивера (принят равным 1 согласно рекомендациям [304]).

Адгезионная прочность более пластичного гальванического хромового покрытия рассчитывалась по формуле [306]

$$\sigma_A = \frac{W_c}{0,5 \cdot S_{бок}} = \frac{2 \cdot W_c}{\pi b^2}, \quad (2.21)$$

где $S_{бок}$ – площадь боковой поверхности индентора, контактирующей с покрытием, мм²; b – половина ширины следа индентора на поверхности покрытия при наблюдаемой критической нагрузке на индентор W_c , мм.

2.3.11. Методика определения коэффициента трения

Определение коэффициента трения производилось на программно-аппаратном комплексе [307, 308] на базе трибометра мод. ПД-1, который позволяет определять коэффициент трения различных материалов в условиях трения скольжения по схеме «неподвижный палец–вращающийся диск» и представлять в графическом виде динамику его изменения. Коэффициент трения в соответствии с ГОСТ 27674–88 рассчитывался по формуле

$$f = \frac{F}{N}, \quad (2.22)$$

где f – коэффициент трения; F – сила трения, Н; N – сила, действующая на неподвижный образец (палец), Н.

На рис. 2.10, *a* представлена расчетная схема для определения силы N , которая рассчитывалась по формуле

$$N = P \frac{B}{A},$$

где P – вес груза, Н; A – расстояние от оси рычага до оси неподвижного образца (пальца), мм; B – расстояние от оси рычага до оси груза, мм.

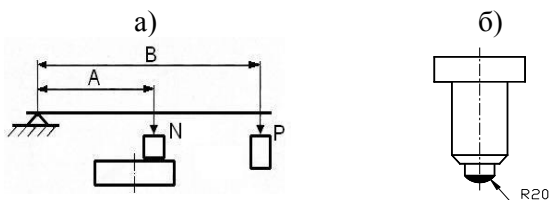


Рис. 2.10. Расчетная схема (*a*) для определения силы N и эскиз (*б*) неподвижного образца (пальца)

Объектами при исследовании коэффициента трения служили образцы в виде диска размером $\varnothing 80 \times 10$ мм из коррозионностойкой стали 40X13 (HRC_s , 50–52), прошедшие закалку в масле при $T_{\text{зак}}=1050$ °С с последующим отпуском при $T_{\text{отп}}=300$ °С [219]. После термообработки образцы шлифовались на плоскошлифовальном станке мод. ОШ 224Н до Ra 0,63 мкм. После чистового шлифования часть образцов подверглась тонкому шлифованию до Ra 0,22 мкм, вторая часть образцов – ЭИП до Ra 0,18 мкм на режимах, приведенных в табл. 2.7, и оставшаяся часть образцов – механическому полированию до Ra 0,12 мкм. Неподвижные цилиндрические образцы из стали У8А (HRC_s , 64–65) (рис. 2.10 б) закаливались в масле при $T_{\text{зак}}=780$ °С с последующим отпуском при $T_{\text{отп}}=170$ °С [219]. Рабочий торец образцов, выполненный в виде полусферы с радиу-

сом $R=20$ мм, после шлифования механически полировался до Ra 0,08–0,12 мкм.

Перед испытаниями трибологический комплекс тарировался с помощью устройства для градуировки силы трения. После тарировки погрешность измерения силы трения не превышала 5 %. Испытания проводились при комнатной температуре в условиях трения скольжения с достаточной и ограниченной подачей смазочного материала, в качестве которого использовалось индустриальное масло ИП-40. Определение коэффициента трения и исследование динамики его изменения производилось при нагрузке на неподвижный образец равной 5,3 Н и скорости относительного скольжения образцов 2,5 м/с.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ

3.1. Основные закономерности электрической проводимости парогазовой оболочки в условиях электроимпульсного полирования

Научная и практическая значимость теоретических и экспериментальных исследований механизма и основных закономерностей прохождения электрического тока через ПГО вытекает из тесной корреляции электрической проводимости ПГО с основными закономерностями физико-химических процессов, протекающих на поверхности анода и в прианодной области электролита и приводящих к съему металла. Анализ современных представлений о механизме прохождения электрического тока через ПГО в анодном режиме обработки, приведенный в разделе 1.2.2, выявил многообразие, противоречивость и необоснованность выдвинутых гипотез. Гипотеза, предложенная нами в работе [242], согласно которой в условиях ЭИП электрический ток, имеющий в своем составе постоянную и высокочастотную составляющие, протекает через ПГО по электролитным мостикам, замыкающим ПГО, и за счет ионной проводимости газовой фазы ПГО, хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работах [112, 169, 180–183, 191, 200, 253–257, 259–261].

3.1.1. Исследование стабильности анодного процесса в режиме электроимпульсного полирования

В разделе 1.3.1 приведено обоснование актуальности исследования стабильности анодного процесса в режиме ЭИП и показано, что ошибки, допущенные на этапах проектирования технологического оборудования или технологического процесса ЭИП, могут привести к невозможности проведения процесса ЭИП и разрушению технологического оборудования.

Безопасное соотношение площадей поверхностей анода и катода ($\Delta = S_a : S_k$), при котором анодный процесс в режиме ЭИП протекает стабильно, определялось в зависимости от концентрации раствора электролита, режимов обработки и условий образования ПГО [309].

В качестве критерия стабильности принято минимальное значение Δ , при котором нет инверсии анодного процесса в катодный. Исследование проводилось с использованием электродов из коррозионностойкой стали 20Х13 в 2–6,5%-м водном растворе сульфата аммония при температуре электролита 70–90 °С.

На первом этапе исследовалось влияние концентрации раствора и температуры электролита на величину соотношения Δ . При проведении эксперимента площадь поверхности катода оставалась постоянной. На электроды подавалось напряжение 300 В, после чего анод погружался в электролит со скоростью 1 мм/с. В момент инверсии анодного процесса в катодный одновременно отключались напряжение и механизм перемещения анода, что позволило корректно определить фактическую площадь поверхности анода, погруженного в раствор, и значение Δ . Ход эксперимента фиксировался цифровой видеокамерой DCR-НС 42Е (SONY, Япония).

На рис. 3.1 в виде графиков представлены зависимости соотношения площадей поверхностей электродов Δ от концентрации раствора и температуры электролита, из которого следует, что даже при температуре электролита равной 70 °С площадь поверхности анода может превышать площадь поверхности катода в 15–20 раз.

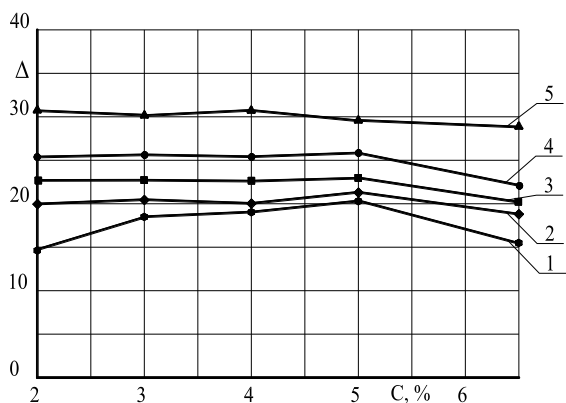


Рис. 3.1. Зависимость соотношения площадей электродов от концентрации сульфата аммония.

Температура электролита, °С:
1 – 70; 2 – 75; 3 – 80; 4 – 85; 5 – 90

Увеличение температуры электролита способствует повышению стабильности анодного процесса, что выражается в росте величины соотношения Δ . Максимальное значение $\Delta = 31:1$ наблюдается при температуре электролита равной $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Анализ полученных данных показал, что увеличение концентрации сульфата аммония в растворе с 2 до 5 масс.% при температуре электролита свыше $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к колебанию величины Δ не более чем на 7,5 %. Дальнейшее повышение концентрации до 6,5 масс.% приводит к снижению величины Δ на 18–23 %. Наиболее заметно влияние концентрации сульфата аммония в растворе при температуре электролита равной $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом случае повышение концентрации с 2 до 6,5 масс.% приводит к колебанию величины Δ более чем на 33%.

Влияние величины напряжения обработки на соотношение Δ исследовалось при температуре электролита 75 и $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Как и в первом случае, площадь поверхности катода оставалась постоянной, а площадь поверхности анода изменялась путем его погружения в раствор. Анализ полученных данных показал, что на стабильность анодного процесса повышение напряжения обработки в диапазоне от 280 до 340 В влияет незначительно – колебание значений Δ не превышало 10 %.

Следует отметить, что представленные данные справедливы для случая, когда площадь поверхности катода постоянна, а площадь поверхности анода плавно возрастает за счет его погружения в раствор. Плавное погружение анода в раствор после подачи на него напряжения приводит к постепенному образованию ПГО около всей поверхности анода по мере его погружения в раствор. При этом происходит плавный прогрев анода до температуры электролита и снижается вероятность срыва ПГО на отдельных участках поверхности анода. Данная схема загрузки заготовок в ванну характерна практически для всех типов промышленного оборудования ЭИП. Однако в некоторых случаях подачу напряжения на электроды осуществляют после полного погружения заготовок в электролит [222, 226]. Аналогичная ситуация наблюдается при случайном полном или частичном срыве ПГО в процессе ЭИП. В этих условиях происходит взрывоподобное образование или восстановление ПГО, что требует применения мощных источников технологического тока при обработке даже небольших по площади поверхности заготовок. Отметим, что, несмотря на очевидную практическую

значимость стабильности процесса ЭИП в условиях взрывоподобного образования ПГО, эти исследования до настоящего времени никем не проводились.

В ходе эксперимента по исследованию стабильности анодного процесса в условиях взрывоподобного образования ПГО площадь поверхности катода оставалась постоянной, а площадь поверхности анода дискретно увеличивалась. На рис. 3.2 представлены графики, показывающие зависимость соотношения Δ от концентрации раствора и температуры электролита при подаче напряжения величиной 300 В на электроды, расположенные в растворе.

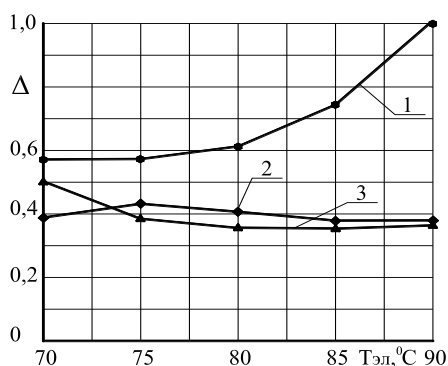


Рис. 3.2. Зависимость соотношения площадей электродов от температуры электролита при взрывоподобном запуске процесса ЭИП.
Концентрация сульфата аммония, масс. %:
1 – 2; 2 – 4; 3 – 6

Из данных, представленных на рис. 3.2, следует, что в условиях взрывоподобного образования ПГО вероятность инверсии анодного процесса в катодный резко возрастает – величина соотношения Δ уменьшилась в 26–78 раз по сравнению с условиями образования ПГО при плавном погружении анода в электролит. При этом стабильность анодного процесса выше при низких концентрациях сульфата аммония и высокой температуре электролита. Так, для 2%-го раствора сульфата аммония при температуре электролита 90 °C стабильность анодного процесса сохраняется при соотношении площадей поверхностей электродов до $\Delta=1:1$ и до $\Delta=1:1,67$ и $1:1,72$ при снижении температуры электролита соответственно до

80 и 70 °С. Увеличение концентрации сульфата аммония до 4–6 масс.% повышает риск инверсии анодного процесса в катодный и практически нивелирует влияние температуры электролита на стабильность анодного процесса, которая сохраняется при соотношении Δ до 1:2–1:2,85 в диапазоне температур от 70 до 90 °С. Следует отметить, что после инверсии анодного процесса в катодный уменьшение площади поверхности анода на 20–25 % приводит к возврату в анодный режим обработки в течение 1–3 с. Этот эффект можно использовать при проектировании систем контроля и адаптивного управления процессом ЭИП.

Таким образом, в зависимости от концентрации раствора электролита, режимов обработки и условий образования ПГО анодный процесс в режиме ЭИП может протекать стабильно в широком диапазоне соотношения площадей поверхностей электродов. При постепенном образовании ПГО около поверхности анода, плавно погружаемого в электролит, площадь поверхности анода может превышать площадь поверхности катода в 15–31 раз. При взрывоподобном образовании ПГО стабильность анодного процесса обеспечивается при превышении площади поверхности катода над площадью поверхности анода более чем в 2,85 раза.

3.1.2. Исследование равномерности распределения электрического тока на поверхности анода в условиях электроимпульсного полирования

Для электрохимических методов обработки, к которым относится ЭИП, точность и производительность обработки в значительной мере зависят от степени равномерности распределения электрического тока на различных участках обрабатываемой поверхности [83, 84]. Оценка равномерности распределения электрического тока на поверхности анода в условиях ЭИП проводилась методом построения электрического поля и путем определения рассеивающей способности электролита [262, 263] по методикам, приведенным в разделе 2.3.4.

Метод построения электрического поля. Электрические потенциалы в различных точках электролитической ячейки измерялись при напряжении на ячейке 250 В и температуре электролита 50 °С. Ячейка представляла собой цилиндрический сосуд

Ø130x200 мм из стали 12X18H10T, корпус которого служил катодом. Анод Ø4x40 мм из стали 10 погружался в электролит на глубину 10 мм вдоль вертикальной оси ячейки. В качестве электролита использовался 1,5%-й водный раствор хлорида аммония. По результатам измерений потенциалов строилось электрическое поле в виде графиков распределения эквипотенциальных линий. На рис. 3.3 представлено распределение эквипотенциальных линий электрического поля в электролите в горизонтальной плоскости на расстоянии 10 мм от зеркала электролита.

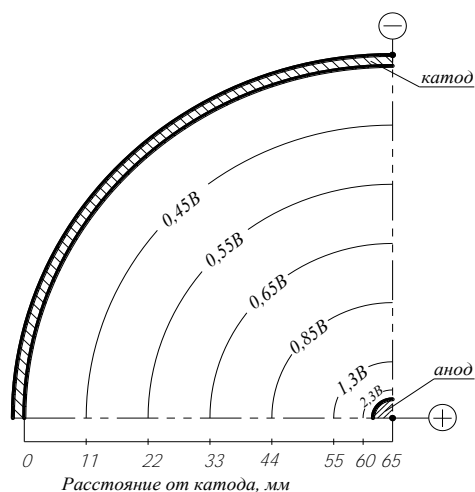


Рис. 3.3. Распределение эквипотенциальных линий электрического поля в горизонтальном сечении (1/4 сечения)

Как следует из рис. 3.3, в условиях ЭИП вследствие образования ПГО электрическое поле в электролите имеет сильно искаженную структуру. При этом основное падение напряжения приходится на прианодную область, непосредственно примыкающую к ПГО. Так, величина потенциала, измеренная относительно анода на расстоянии 3 мм от его поверхности, превышает 99 % от величины напряжения, поданного на электролитическую ячейку, что хорошо согласуется с данными, приведенными в монографиях [112, 221]. Следует отметить, что для оценки равномерности распределения электрического тока на поверхности анода и равномерности съема

металла при ЭИП метод построения электрического поля оказался недостаточно информативным. Однако полученные данные о падении напряжения на прианодной области в условиях ЭИП имеют большое значение для понимания механизмов электрической проводимости ПГО и съема металла с обрабатываемой поверхности.

Метод исследования распределения тока на поверхности анода путем определения рассеивающей способности электролита. Исследование рассеивающей способности электролита и точности обработки при ЭИП проводилось в три этапа по методикам, приведенным в разделе 2.3.4. Учитывая возможную общность характеров анодных процессов в условиях ЭИП и ЭХП, а также для проведения сравнительного анализа полученных данных, в ходе эксперимента дополнительно оценивалась рассеивающая способность электролита и равномерность съема металла при ЭХП коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т.

На первом этапе исследовалось влияние геометрических факторов обработки (формы, размеров электролитической ячейки и электродов, взаимного расположения электродов относительно друг друга и относительно стенок ячейки) на рассеивающую способность электролитов при ЭИП и ЭХП в прямоугольной (рис. 2.6) и цилиндрической электролитических ячейках [264–266]. Рассеивающая способность рассчитывалась по формуле (2.4).

На диаграммах, представленных на рис. 3.4, приведен удельный съем металла на секциях разборных анодов в условиях ЭИП, рассчитанный по (2.5). Из представленных данных следует, что при ЭИП в прямоугольной и цилиндрической ячейках изменение масс разборных анодов практически одинаково. В обоих случаях среднее значение рассеивающей способности электролита составляло 99 %, что свидетельствуют о минимальном влиянии геометрических факторов обработки на равномерность распределения электрического тока на поверхности анода и съема металла в условиях ЭИП. Несущественная разница в съеме металла на секциях разборных анодов вызвана колебанием температуры электролита, возникшим вследствие незначительного нарушения движения самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите.

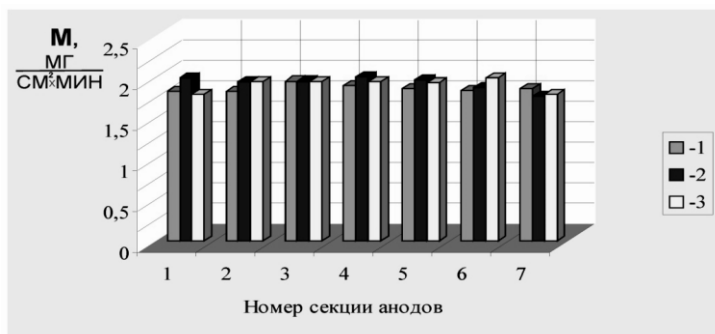


Рис. 3.4. Удельный съем металла на секциях анодов при ЭИП:
 1; 2 – соответственно ближний и дальний аноды прямоугольной ячейки,
 3 – дальний анод цилиндрической ячейки

На диаграммах, представленных на рис. 3.5, приведено распределение удельного съема металла на секциях разборных анодов при ЭХП в прямоугольной ячейке.

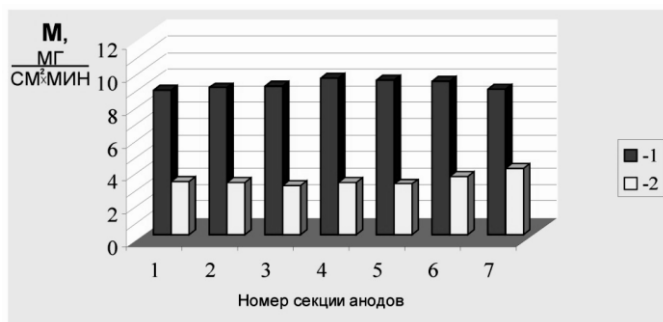


Рис. 3.5. Удельный съем металла на секциях анодов при ЭХП:
 1 – ближний анод, 2 – дальний анод

Анализ полученных данных показал, что средняя величина съема металла на секциях ближнего анода более чем в 3,2 раза превышает аналогичную величину на секциях дальнего анода. При этом среднее значение рассеивающей способности электролита составило 55 %, что свидетельствует о том, что на характер съема металла в условиях ЭХП значительное влияние оказывает степень не-

равномерности распределения силовых линий электрического поля в электролите, обусловленная геометрическими факторами обработки такими, как конфигурация и размеры электролитической ячейки и электродов, расположение электродов относительно друг друга и стенок ячейки.

По этой причине на втором этапе исследовалось влияние распределения силовых линий электрического поля на равномерность съема металла с поверхности анода при обработке в электролитической ячейке, представленной на рис. 2.7. В этом случае электрическое поле в ячейке имеет более сложную структуру, а нарушение движения самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите сведено к минимуму, что обусловлено расположением одного разборного анода на продольной оси ячейки. На рис. 3.6 в виде графиков представлены зависимости величины съема металла на сторону от межэлектродного расстояния при ЭИП и ЭХП. Съем металла на сторону рассчитывался по формуле (2.6).

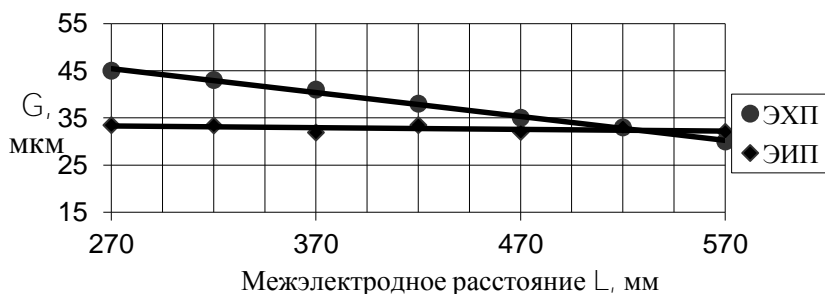


Рис. 3.6. Зависимость величины съема металла на сторону от межэлектродного расстояния при ЭИП и ЭХП

Видно, что в обоих случаях зависимости имеют линейный характер. Однако при ЭИП угол наклона прямой не превышает $0,6^\circ$, в то время как при ЭХП угол равен 6° . Приведенные данные свидетельствуют о том, что в условиях ЭИП распределение силовых линий электрического поля в ячейке не оказывает заметного влияния на точность обработки — разница в величине съема металла на сторону для ближней и дальней секций разборного анода не превышает 1,5 мкм (4 %). При этом рассеивающая способность электролита для

различных секций разборного анода составляла от 90 до 100 % (среднее значение 97 %).

При ЭХП распределение силовых линий в электролите, обусловленное геометрическими факторами обработки, оказывает существенное влияние на равномерность распределения электрического тока на обрабатываемой поверхности и, соответственно, на равномерность съема металла и точность обработки – разница в величине съема металла на сторону для ближней и дальней секций разборного анода составила 16 мкм (более 34 %). При этом рассеивающая способность электролита для различных секций разборного анода не превышала 55 %.

На заключительном этапе исследования проведен сравнительный анализ точности обработки при ЭИП и ЭХП с использованием круглограмм, по которым определялись волнистость и отклонение от круглости поверхности образцов. На рис. 3.7 в качестве примера представлены круглограммы поверхностей после обработки для межэлектродного расстояния $L=570$ мм.

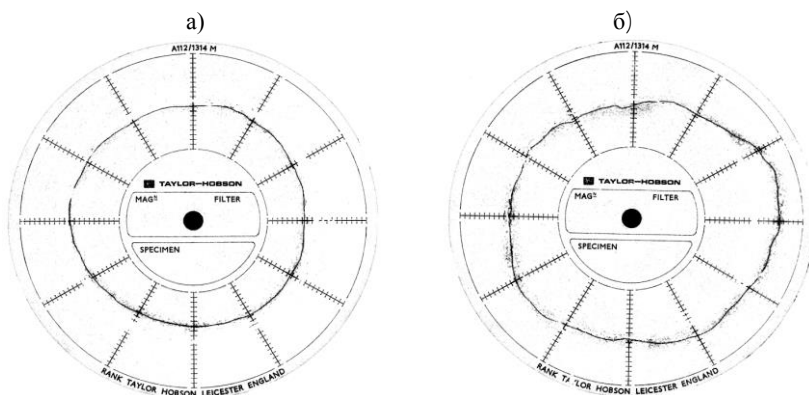


Рис. 3.7. Круглограммы поверхности после ЭИП (а) и ЭХП (б)

Результаты измерений волнистости и отклонения от круглости поверхности образцов после ЭХП и ЭИП приведены соответственно в табл. 3.1 и 3.2. Обработка результатов измерений производилась следующим образом. Учитывая то, что обработке подвергались предварительно шлифованные образцы, при анализе полученных

данных были исключены значения параметров, не характерные для данных поверхностей – измеренные до проведения обработки и соответствующие им значения после обработки. В табл. 3.1 и 3.2 эти значения помечены символом (*). После этого рассчитывались средние арифметические значения волнистости и отклонения от круглости для дальнего и ближнего образцов. В процентном выражении рассчитывалось улучшение, обозначенное в табл. 3.1 и 3.2 со знаком (–) или ухудшение, обозначенное со знаком (+), соответствующего параметра относительно его среднего арифметического значения, рассчитанного до обработки.

Таблица 3.1 – Отклонение от круглости и волнистость исходной поверхности и поверхности после ЭХП

Образец	Номер сечения	Отклонение от круглости, мкм		Волнистость, мкм	
		Исходная поверхность	Поверхность после ЭХП	Исходная поверхность	Поверхность после ЭХП
Дальний (межэлектродное расстояние 570 мм)	1	2,7	4,5	1,9	1,9
	2	8,0*	3,9*	5,2*	1,9*
	3	2,7	4,3	2,3	1,9
	4	3,1	4,3	2,3	3,7
	5	4,1*	4,5*	2,9*	1,7*
	Среднее значение	2,83	4,37	2,17	2,50
	Изменение параметра, %	+ 54,4		+15,2	
Ближний (межэлектродное расстояние 270 мм)	1	2,9	2,1	4,5	2,1
	2	2,7	2,5	1,4	1,5
	3	2,3*	2,9*	1,7*	1,5*
	4	1,7*	1,9*	2,1*	1,7*
	5	2,9	3,7	2,3	2,5
	Среднее значение	2,83	2,76	2,73	2,03
	Изменение параметра, %	-2,5		-25,6	

Таблица 3.2 – Отклонение от круглости и волнистость исходной поверхности и поверхности после ЭИП

Образец	Номер сечения	Отклонение от круглости, мкм		Волнистость, мкм	
		Исходная поверхность	Поверхность после ЭИП	Исходная поверхность	Поверхность после ЭИП
Дальний (межэлектродное расстояние 570 мм)	1	4,3	4,0	3,7	1,5
	2	6,0*	6,0*	5,8*	2,1*
	3	5,6	4,6	2,7	1,9
	4	4,5	4,3	2,3	2,3
	5	3,2*	3,5*	1,7*	3,5*
	Среднее значение	4,80	4,30	2,90	1,90
	Изменение параметра, %	-10,4		-34,5	
Ближний (межэлектродное расстояние 270 мм)	1	3,7	3,3	1,9	2,5
	2	3,5	1,7	6,3	2,5
	3	3,1*	1,9*	2,9*	1,5*
	4	2,9*	1,5*	2,9*	1,9*
	5	3,5	3,1	2,7	1,4
	Среднее значение	3,57	2,70	3,63	2,13
	Изменение параметра, %	-24,4		-41,3	

Следует отметить, что в соответствии с алгоритмом, реализованным в использованной нами измерительной системе Talirond-73 (Rank Taylor Hobson, Англия), прибор автоматически описывает мнимую прилегающую окружность вокруг реального профиля поверхности и относительно нее производит измерение отклонения от круглости. Учитывая, что в условиях ЭИП и ЭХП нет жесткого контакта обрабатываемой поверхности с инструментом, в качестве которого выступает электролит, можно утверждать, что геометрические оси исходных образцов и образцов после ЭИП и ЭХП не совпадают. Однако, даже, несмотря на это, экспериментальные данные, представленные на рис. 3.7 и в табл. 3.1 и 3.2, свидетельствуют

о существенном преимуществе ЭИП перед ЭХП по обеспечению точности обработки. Так, ЭИП снижает отклонение от круглости и волнистость исходной поверхности соответственно на 10,4–24,4 % и 34,5–41,3 %, в то время как ЭХП снижает отклонение от круглости и волнистость исходной поверхности лишь для ближнего образца соответственно на 2,5 и 25,6 %, а для дальнего образца ухудшает эти параметры соответственно на 54,4 и 15,2 %.

Таким образом, в условиях ЭИП геометрические факторы обработки такие, как конфигурация и размер электродов и электролитической ячейки, взаимное расположение электродов относительно друг друга и стенок ячейки не оказывают заметного влияния на равномерность распределения электрического тока на обрабатываемой поверхности. На равномерность распределения электрического тока на обрабатываемой поверхности решающее влияние оказывает ПГО, структура и толщина которой являются основными факторами, определяющими точность обработки.

Учитывая полученные экспериментальные данные, принятые в разделе 2.3.4 допущения и выражение (2.3), при анализе процесса ЭИП вместо термина “рассеивающая способность электролита” более корректно, на наш взгляд, было бы использовать термин “рассеивающая способность процесса ЭИП”.

3.1.3. Исследование амплитудных, частотных и спектральных характеристик электрического тока, протекающего через парогазовую оболочку при анодном процессе

Исследования проводились по методике, приведенной в разделе 2.3.2. Осциллографические исследования электрического тока в ПГО выполнялись с помощью электронного запоминающего осциллографа С8-13 [255, 257]. Здесь важно отметить, что каждая из осциллограмм, приведенных в этом разделе, представляет собой одну из возможных реализаций процесса ЭИП в конкретный момент времени продолжительностью 2 мкс, а сам процесс ЭИП, выраженный в виде осциллограмм, представляет собой бесконечную совокупность таких реализаций, образующих статистический ансамбль. Численная оценка амплитудных и частотных характеристик электрического тока производилась по изображению на экране осциллографа с учетом вертикальной и горизонтальной разверток осциллографа

циллографа и сопротивления шунта. При оценке постоянной составляющей тока за начало отсчета принята нижняя линия сетки экрана осциллографа.

С помощью частотомера ЧЗ-34 измерялась частота высокочастотной составляющей тока, усредненная на значительно более продолжительном временном интервале по сравнению с интервалом времени равном 2 мкс.

Спектральные характеристики электрического тока в ПГО исследовались с использованием гетеродинного анализатора спектра СК4-56 [254, 256], который предназначен для получения спектров сигналов произвольной формы и модуляции и позволяет исследовать распределение электромагнитных колебаний в полосе частот от 10 Гц до 60 кГц с разрешающей способностью 3 Гц и погрешностью измерения уровней сигнала 5–8 %.

3.1.3.1. Осциллографические исследования электрического тока

На первом этапе исследовалось влияние температуры электролита в диапазоне 50–90 °С на величину постоянной и амплитуду и частоту переменной составляющих электрического тока при напряжении обработки 300 В и площади поверхности образца 7,5 см².

На рис. 3.8 представлены осциллограммы тока, полученные при температуре электролита 60; 70 и 80 °С, из которого видно, что при повышении температуры с 60 до 80 °С уровень постоянной составляющей тока снижается в 2,38 раза (с 5,7 до 2,4 А). Обратная пропорциональная зависимость величины постоянной составляющей электрического тока от температуры электролита обусловлена изменением физико-механических свойств раствора электролита, в частности, снижением поверхностного натяжения и кинематической вязкости [310], и уменьшением количества электрической энергии, расходуемого на поддержание (обновление) ПГО. В результате этого средняя толщина ПГО увеличивается [112, 169, 205, 221]. Для режимов электролитно-плазменного нагрева, электрогидродинамического и электролитно-разрядного электрический ток в электролитической ячейке встречает наибольшее сопротивление в ПГО [264–266]. Следовательно, увеличение толщины ПГО приво-

дит к росту электрического сопротивления ПГО и снижению величины постоянной составляющей электрического тока.

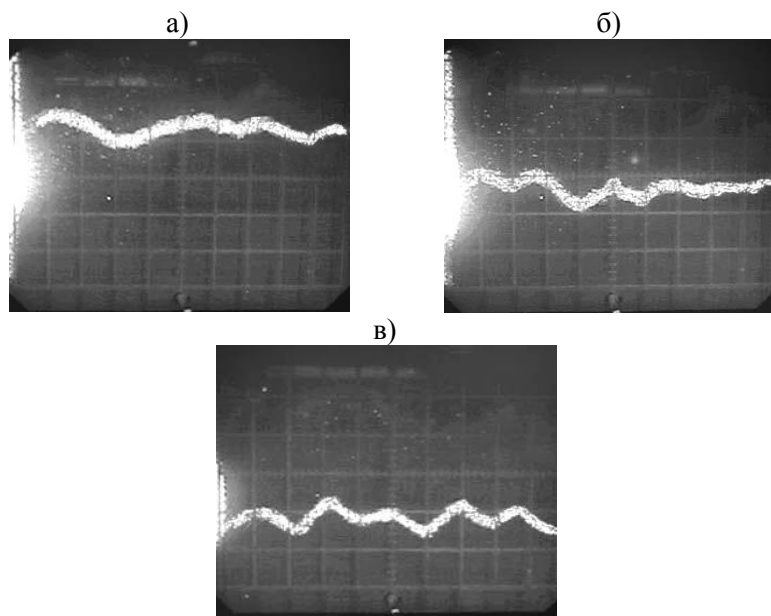


Рис. 3.8. Осциллограммы электрического тока при температуре электролита, °С: 60 (а), 70 (б), 80 (в).
Горизонтальная и вертикальная развертки осциллографа: соответственно 0,2 мкс/дел и 5 мВ/дел

В то же время амплитуда и частота высокочастотной составляющей тока остаются квазипостоянными величинами на временном интервале 2 мкс и в среднем составляют соответственно 0,65 А и 2,5 МГц (рис. 3.9). На первый взгляд, этот факт противоречит ранее сделанному выводу о влиянии температуры электролита на среднюю толщину ПГО, увеличение которой должно влиять на характер осциллограмм переменной составляющей электрического тока. Действительно, это было бы справедливо в случае, когда система «металлический анод–ПГО–электролитный катод» представляла бы собой статическую геометрически правильную плоскопараллельную систему. В реальных условиях обработки эта система

является динамически устойчивой системой, в различных областях которой толщина ПГО варьируется в определенных пределах. Повышение температуры электролита приводит к росту средней толщины ПГО. Очевидно, что при напряженности электрического поля в оболочке $\sim 10^6\text{--}10^7$ В/м электролитные мостики, замыкающие ПГО, зарождаются на максимально приближенных к поверхности анода участках электролита вне зависимости от средней толщины ПГО. Причем эти события имеют случайный характер, вследствие чего нет видимой корреляции между амплитудой и частотой высокочастотной составляющей тока, измеренными на осциллограммах тока, с толщиной ПГО для исследованного диапазона температур электролита при напряжении обработки 300 В.

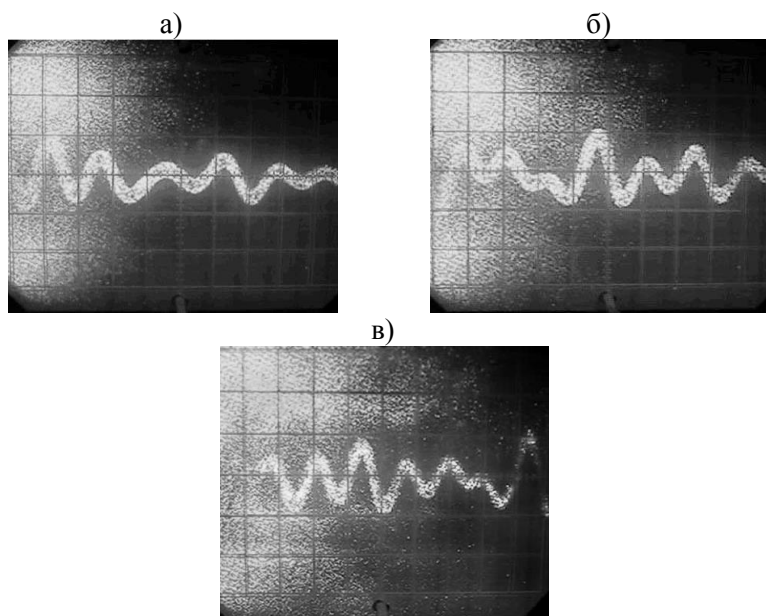


Рис. 3.9. Осциллограммы высокочастотной составляющей электрического тока при температуре электролита, °С: 60 (а); 70 (б); 80 (в).
Горизонтальная и вертикальная развертки осциллографа:
соответственно 0,2 мкс/дел и 5 мВ/дел

Однако данные, полученные с помощью частотомера, выявили более сложный характер зависимости частоты высокочастотной составляющей электрического тока от температуры электролита (рис. 3.10).

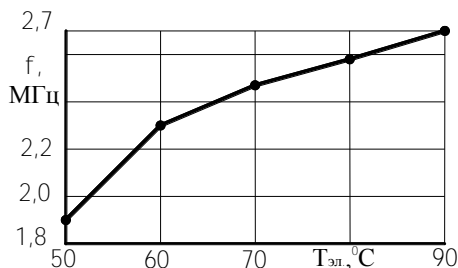


Рис. 3.10. Зависимость частоты высокочастотной составляющей электрического тока от температуры электролита при $U=300$ В и $S_{обр}=16$ см²

Как следует из рис. 3.10, повышение температуры электролита с 50 до 90 °C приводит к росту частоты переменной составляющей тока с 1,9 до 2,7 МГц. Данный факт также можно объяснить влиянием температуры раствора электролита на его физико-механические свойства. При повышении температуры снижаются поверхностное натяжение и кинематическая вязкость раствора электролита [310]. В результате более легкого образования электролитных мостиков вероятность их возникновения повышается, что приводит к росту частоты переменной составляющей тока.

На втором этапе исследовалось влияние напряжения обработки в диапазоне от 125 до 400 В на уровень постоянной и амплитуду и частоту переменной составляющих электрического тока.

В электрогидродинамическом режиме обработки, в котором реализуется процесс ЭИП, при повышении напряжения обработки с 250 до 330 В уровень постоянной составляющей электрического тока незначительно снижается (рис. 3.11), что обусловлено ростом средней толщины ПГО [112, 205, 311], приводящим к увеличению электрического сопротивления ПГО и пропорциональному снижению величины постоянной составляющей тока.

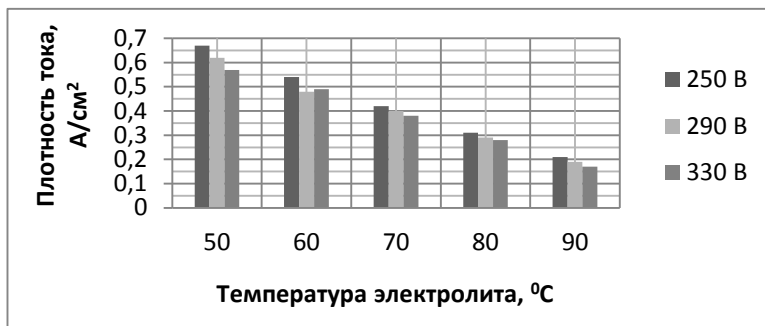


Рис. 3.11. Зависимость плотности электрического тока от напряжения обработки и температуры электролита

Анализ полученных осциллограмм показал, что высокочастотная составляющая электрического тока в ПГО характерна для трех исследованных режимов анодного процесса: электролитно-плазменного нагрева, электрогидродинамического и электролитно-разрядного (рис. 3.12).

На рис. 3.13 представлены осциллограммы высокочастотной составляющей тока, полученные при обработке в электрогидродинамическом и электролитно-разрядном режимах, из которых следует, что амплитуда высокочастотной составляющей электрического тока при повышении напряжения обработки от 235 В монотонно возрастает со средней величины равной 0,55 А и достигает максимального значения равного в среднем 0,65 А при напряжении обработки 300 В (рис. 3.13, *a–в*). Дальнейшее повышение напряжения приводит к постепенному снижению амплитуды высокочастотной составляющей электрического тока (рис. 3.13, *з*) и при переходе в электролитно-разрядный режим обработки амплитуда высокочастотной составляющей тока имеет минимальное значение (рис. 3.13, *д; е*).

В электрогидродинамическом режиме при увеличении напряжения обработки частота переменной составляющей электрического тока снижается (рис. 3.14). Этот факт можно объяснить тем, что при повышении напряжения обработки растет средняя толщина ПГО [111, 201, 271]. При неизменной температуре электролита увеличение толщины ПГО приводит к снижению вероятности образования

электролитных мостиков, замыкающих ПГО, и, как следствие, к снижению частоты переменной составляющей электрического тока.

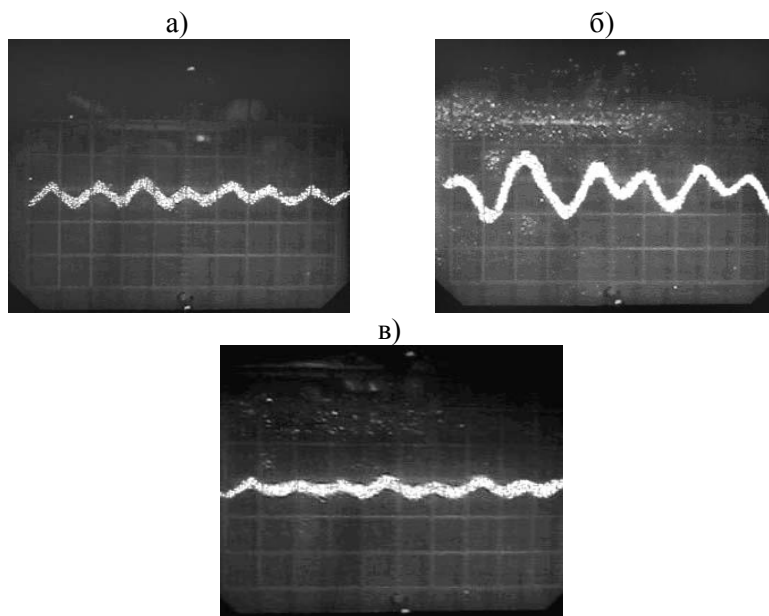


Рис. 3.12. Осциллограммы высокочастотной составляющей тока при $T_{эл}=80\text{ }^{\circ}\text{C}$:
a – режим электролитно-плазменного нагрева, *б* – электрогидродинамический,
в – электролитно-разрядный.

Горизонтальная и вертикальная развертки осциллографа:
соответственно 0,2 мкс/дел и 5 мВ/дел

На заключительном этапе исследовалось влияние площади поверхности образца в диапазоне от 2,5 до 16 см² на величину постоянной и амплитуду и частоту высокочастотной составляющих электрического тока при напряжении обработки 300 В. На рис. 3.15 в качестве примера приведены осциллограммы тока, полученные при обработке образцов с площадью поверхности 2,5; 5,0 и 7,5 см², из которого следует, что увеличение площади обрабатываемой поверхности на каждые 2,5 см² приводит к пропорциональному росту постоянной составляющей тока в среднем на 0,65 А. Этот факт объясняется тем, что при неизменной плотности электрического тока для данных условий обработки (рис. 3.11) увеличение площади по-

верхности вызывает пропорциональный рост силы тока в цепи и повышение уровня постоянной составляющей тока.

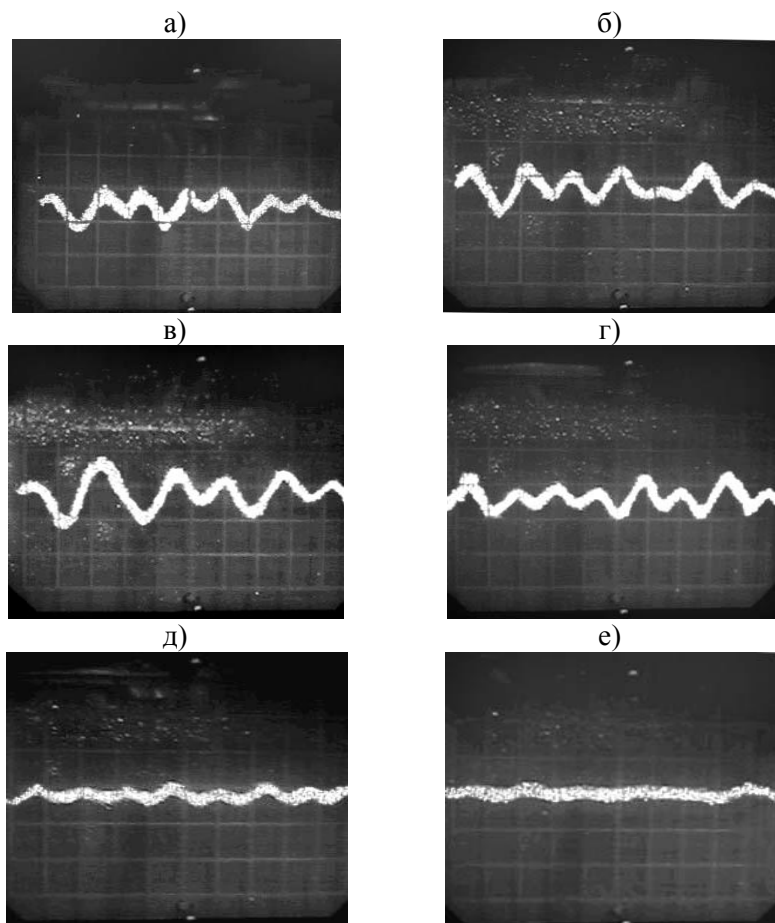


Рис. 3.13. Осциллограммы высокочастотной составляющей тока в электрогидродинамическом режиме при напряжении обработки 235 В (а), 275 В (б), 300 В (в) и в электролитно-разрядном режиме при напряжении обработки 350 В (г), 375 В (д) и 400 В (е).

Горизонтальная и вертикальная развертки осциллографа: соответственно 0,2 мкс/дел и 5 мВ/дел

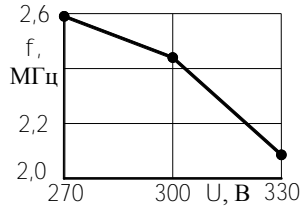


Рис. 3.14. Зависимость частоты высокочастотной составляющей электрического тока от напряжения обработки ($T_{эл}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$; $S_{обр}=10\text{ см}^2$)

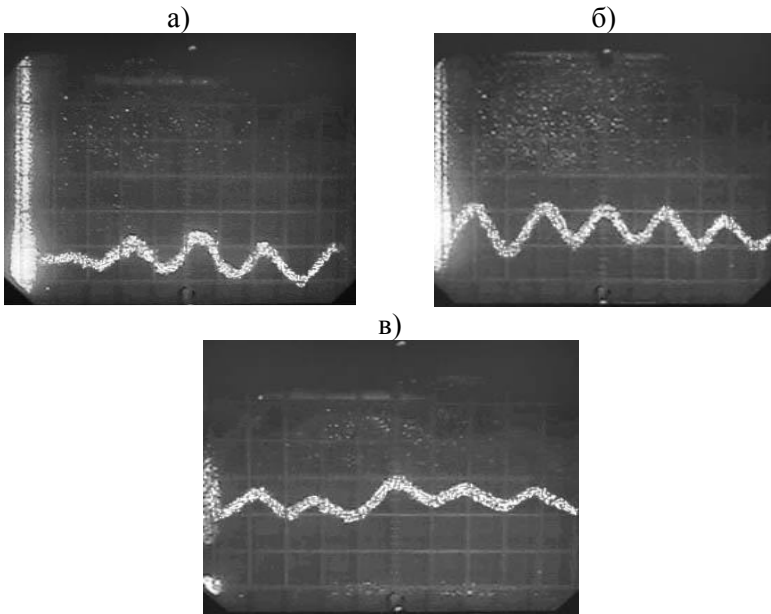


Рис. 3.15. Осциллограммы электрического тока при $T_{эл}=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от площади поверхности образца, см^2 :
a – 2,5; *б* – 5,0; *в* – 7,5.

Горизонтальная и вертикальная развертки осциллографа: соответственно 0,2 мкс/дел и 5 мВ/дел

Для исследованного диапазона площадей обрабатываемой поверхности амплитуда и частота высокочастотной составляющей электрического тока остаются квазипостоянными величинами на временном интервале 2 мкс и в среднем составляют соответственно

2,5 МГц и 0,65 А (рис. 3.15). Однако, как и в случае исследования влияния температуры электролита на частоту переменной составляющей тока, данные, полученные с помощью частотомера, выявили более сложный характер зависимости частоты высокочастотной составляющей тока от площади обрабатываемой поверхности (рис. 3.16).

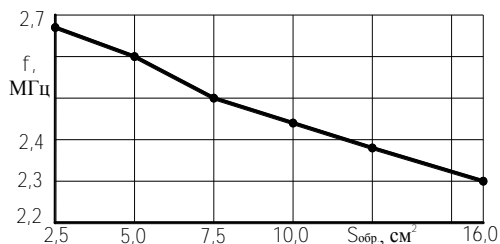


Рис. 3.16. Зависимость частоты высокочастотной составляющей тока от площади обрабатываемой поверхности при $T_{эл}=60$ °C и $U=300$ В

Как следует из рис. 3.16, увеличение площади обрабатываемой поверхности с 2,5 до 16 см² приводит к снижению частоты переменной составляющей тока с 2,67 до 2,30 МГц. Выявленная зависимость может быть объяснена эффектом перекрытия импульсов электрического тока [312] от отдельных электролитных мостиков, замыкающих ПГО.

Таким образом, при электролитной анодной обработке в режимах электролитно-плазменного нагрева, электрогидродинамическом и электролитно-разрядном в структуре электрического тока, протекающего через ПГО, наряду с постоянной составляющей присутствует высокочастотная составляющая тока с разными уровнями амплитуды и частоты. Уровень постоянной составляющей тока определяется величиной электрического сопротивления ПГО. Наибольший уровень амплитуды высокочастотной составляющей тока наблюдается в электрогидродинамическом режиме обработки, причем максимальное значение уровня достигается при напряжении обработки 300 В. Частота высокочастотной составляющей тока, полученная с помощью осциллограмм на временном интервале 2 мкс, для конкретных условий обработки является квазипостоянной величиной, в то время как, частота, измеренная частотомером на более продолжительном временном интервале, для исследованных

диапазонов параметров обработки ($T_{эл} = 50\text{--}90\text{ }^{\circ}\text{C}$; $U = 125\text{--}400\text{ В}$; $S_{обр} = 2,5\text{--}16\text{ см}^2$) повышается при увеличении температуры электролита и снижается при увеличении напряжения обработки и площади обрабатываемой поверхности.

3.1.3.2. Исследование спектральных характеристик электрического тока

Очевидно, что для режимов электролитно-плазменного нагрева, электрогидродинамического и электролитно-разрядного электрическая проводимость ПГО обеспечивается в результате реализации физических процессов, протекающих в ПГО. При этом амплитуда и частота электрического тока представляют собой случайные величины, мгновенные значения которых заранее неизвестны. В радиотехнике такие физические величины называют случайными или аналоговыми сигналами, подчеркивая тем самым, что такой сигнал полностью подобен порождающему его физическому процессу [313–315]. При разложении такого сигнала в ряд Фурье и анализе его спектра появляется дополнительная возможность для изучения особенностей сигнала и механизма порождающих его физических процессов. В этом разделе и далее при анализе спектров сигнала тока, протекающего в ПГО, будем использовать терминологию, принятую в математическом аппарате Фурье.

В ходе экспериментов исследовалось влияние температуры электролита, величины напряжения обработки, площади обрабатываемой поверхности, принудительного перемешивания электролита и параметров выходного сглаживающего фильтра источника технологического тока на спектральные характеристики электрического тока, протекающего в ПГО [253, 254, 256, 257].

Особенностью полученных спектров является их подобие и непрерывный характер. Анализ спектров показал, что в полосе частот от 0,01 до 10,0 кГц гармоники тока по амплитуде распределены неравномерно (рис. 3.17). Из рис. 3.17 следует, что гармоники тока с наибольшими амплитудами сосредоточены в полосе частот от 0,01–0,02 до 0,9–1,2 кГц. При этом на частотах свыше 0,9–1,2 кГц спектры тока подобны спектру белого шума с низким уровнем амплитуд спектральных составляющих.

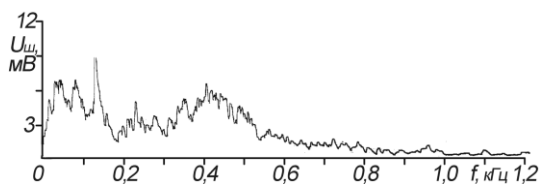


Рис. 3.17. Спектр электрического тока в ПГО, полученный при $U=300$ В, $T_{эл}=70$ °С и $S_{обр}=16,328$ см²

Сравнительный анализ полученных спектров показал, что в областях частот 0,05–0,15 кГц и 0,4–0,7 кГц сосредоточены гармоники тока с максимальными амплитудами. Назовем эти гармоники основными гармониками тока, а ансамбли основных гармоник в областях частот 0,05–0,15 кГц и 0,4–0,7 кГц – совокупными пиками основных гармоник. При этом совокупный пик основных гармоник в полосе частот от 0,4 до 0,7 кГц назовем характерным пиком основных гармоник тока в ПГО, а спектр тока в полосе частот от 0,9 до 10,0 кГц – спектром шума.

Анализ полученных спектров показал, что уровни совокупных пиков зависят от условий проведения процесса обработки. Так, при увеличении площади обрабатываемой поверхности и напряжения обработки амплитуда этих пиков возрастает. Кроме совокупных пиков основных гармоник, в спектрах присутствуют гармоники тока на частотах, кратных частоте сети (рис. 3.18). Амплитуды этих гармоник могут достигать значительной величины и главным образом зависят от величины емкости и индуктивности выходного сглаживающего фильтра источника технологического тока.

Влияние температуры электролита на характер спектров тока изучался при напряжении обработки равном 300 и 375 В при изменении площади обрабатываемой поверхности от 2,5 до 16,0 см². В ходе эксперимента температура электролита повышалась дискретно от 50 до 90 °С с шагом 10 °С и поддерживалась с точностью ± 1 °С. Анализ полученных спектров показал, что при напряжении обработки 300 В для одной и той же температуры электролита при разных обрабатываемых площадях уровень совокупных пиков основных гармоник тока ниже в 2–10 раз по сравнению с напряжением обработки равном 375 В. При этом амплитуда совокупного пика в области частот от 0,4 до 0,7 кГц оказалась ниже в 1,5–6 раз, в то

время как амплитуда совокупного пика в области частот от 0,05 до 0,15 кГц практически не изменилась (рис. 3.17 и 3.19).

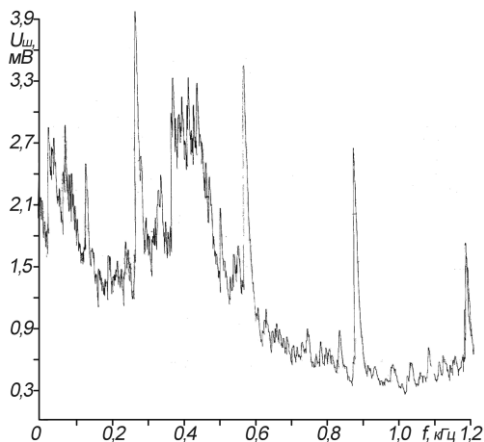


Рис. 3.18. Гармоники тока на частотах, кратных частоте сети

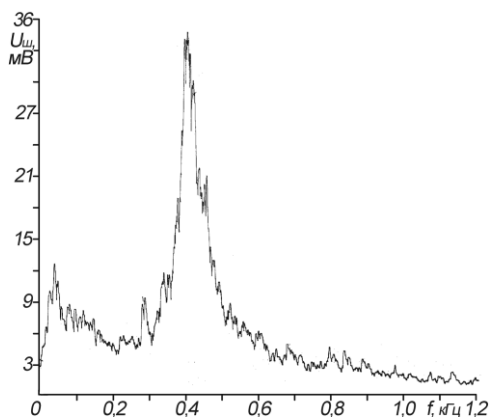


Рис. 3.19. Спектр электрического тока, полученный при $U=375$ В, $T_{эл}=50$ °С и $S_{обр}=16,328$ см²

При повышении температуры электролита для одних и тех же значений напряжения обработки и площади обрабатываемой по-

верхности амплитуды совокупных пиков основных гармоник тока снижаются в 1,2–2,2 раза. Области частот совокупных пиков от температуры электролита зависят несущественно.

Уровень спектральных составляющих тока на частотах свыше 0,9–1,2 кГц оказался более чем в 1,5 раза выше для режимов электролитно-плазменного нагрева и электролитно-разрядного по сравнению с электрогидродинамическим режимом анодной обработки. При этом для одних и тех же условий обработки в электрогидродинамическом режиме при повышении температуры электролита в исследованном диапазоне значений амплитуды этих гармоник тока снижаются на 4–9 %.

Влияние принудительного перемешивания электролита на характеристики электрического тока исследовалось при температуре электролита $80 \pm 1^\circ\text{C}$, напряжении обработки 300 В и площади поверхности образца $7,5 \text{ см}^2$. Сравнительный анализ полученных спектров показал, что при включении принудительного перемешивания электролита внешний вид спектров тока изменяется незначительно при одновременном повышении в среднем на 20 % среднеквадратичного значения электрического тока и в 1,5 раза уровня совокупного пика основных гармоник в области частот от 0,4 до 0,7 кГц [253].

Известно [94, 112, 207, 223, 316], что параллельное включение конденсаторов на выходе выпрямителя источника технологического тока повышает, а последовательное с нагрузкой включение катушки индуктивности снижает устойчивость процесса при электролитно-плазменном нагреве, в коммутационном и электрогидродинамическом режимах обработки. В условиях ЭИП процесс обработки считается устойчивым, когда вся обрабатываемая поверхность покрыта сплошной динамически устойчивой ПГО, отсутствуют ее срывы, приводящие к броскам тока в электрической цепи, и нагрев локальных участков обрабатываемой поверхности, значительно превышающий температуру электролита [207, 222].

Исследование влияния параметров выходного сглаживающего фильтра источника технологического тока на устойчивость процесса ЭИП и спектральные характеристики электрического тока в ПГО проводилось при напряжении обработки 300 В, температуре электролита $80 \pm 1^\circ\text{C}$ и площади поверхности образца $7,5 \text{ см}^2$. На выходе выпрямителя источника технологического тока включался сглажи-

вающий фильтр, построенный по одной из схем, представленных на рис. 3.20.

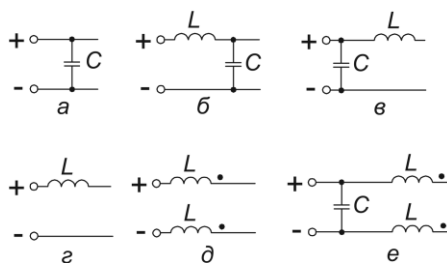


Рис. 3.20. Электрические схемы выходного сглаживающего фильтра.

Номер схемы фильтра:

$a - 1; б - 2; в - 3; г - 4; д - 5; е - 6$

Схема 1 (рис. 3.20, а) часто используется в промышленных установках ЭИП. Суммарная емкость C -фильтра выбирается производителем оборудования в зависимости от мощности источника технологического тока на основе собственного практического опыта. По этой причине схема 1 с $C = 1750$ мкФ была принята в качестве базовой схемы при анализе влияния параметров выходного сглаживающего фильтра источника технологического тока на устойчивость процесса ЭИП и спектральные характеристики электрического тока.

Анализ полученных спектров показал [253], что уменьшение емкости конденсатора C до 100 мкФ в фильтре, построенном по схеме 1, приводит к росту амплитуды характерного пика основных гармоник тока в среднем на 14 % и уровня гармоник в спектре шума на 37 %. Включение Г-образного LC -фильтра (схема 2 на рис. 3.20, б) с $L = 0,9$ мГн и $C = 100$ мкФ по сравнению со схемой 1 с $C=100$ мкФ повышает амплитуду характерного пика в 1,2 раза и снижает уровень гармоник в спектре шума в среднем на 9 % при одновременном снижении устойчивости процесса ЭИП, которое выражалось в эпизодических кратковременных срывах ПГО. По сравнению с базовой схемой схема 2 вызывает увеличение амплитуды характерного пика и уровня гармоник в спектре шума в среднем соответственно на 37 % и 25 %.

По сравнению со схемой 2 подключение Г-образного LC -фильтра (схема 3 на рис. 3.20, в) с $L = 0,9$ мГн и $C = 100$ мкФ снижает амплитуду характерного пика основных гармоник тока в среднем на 45 % и

уровень гармоник в спектре шума на 11 %. При этом по сравнению с базовой схемой амплитуда характерного пика снижается на 5 % при одновременном повышении уровня гармоник в спектре шума на 12 %. Увеличение емкости конденсатора C до 1750 мкФ при той же величине индуктивности по сравнению с базовой схемой вызывает увеличение амплитуды характерного пика в среднем на 14 % и в 1,25 раза уровня гармоник в спектре шума. Уменьшение величины индуктивности катушки L до 0,1 мГн при $C = 1750$ мкФ по сравнению с базовой схемой приводит к росту амплитуды характерного пика на 43 % и уровня гармоник в спектре шума на 12 %.

По сравнению с базовой схемой подключение L -фильтра (схема 4 на рис. 3.20, z) с $L = 0,9$ мГн повышает уровень характерного пика основных гармоник тока в среднем на 43 % и в 2,25 раза уровень гармоник в спектре шума. Встречное включение двух катушек индуктивности (схема 5 на рис. 3.20, d) с $L_1 = L_2 = 0,1$ мГн по сравнению с базовой схемой повышает амплитуду характерного пика в среднем на 71 % и в 1,7 уровня гармоник в спектре шума. Подключение к выходу выпрямителя сложного фильтра (схема 6 на рис. 3.20, e) с $C = 100$ мкФ и $L_1 = L_2 = 0,1$ мГн позволило по сравнению с базовой схемой снизить уровень характерного пика основных гармоник тока на 46 % при одновременном снижении уровня гармоник в спектре шума на 14 %.

При отключении от выхода выпрямителя фильтрующих цепей амплитуда характерного пика основных гармоник тока имела максимальную величину, в 2 раза превышавшую уровень характерного пика, полученного для базовой схемы. При этом уровень гармоник в спектре шума имел минимальное значение по сравнению с исследованными схемами выходного сглаживающего фильтра и по сравнению с базовой схемой его величина была ниже в 3,1 раза. Следует отметить, что в этом случае устойчивость процесса ЭИП была значительно ниже по сравнению с базовой схемой сглаживающего фильтра.

Опираясь на полученные данные, можно с уверенностью говорить о негативном влиянии высокой амплитуды характерного пика основных гармоник тока на характер протекания процесса ЭИП, в частности, на его устойчивость. По этой спектральной характеристике электрического тока в ПГО схемы 1 и 6 (рис. 3.20, a ; e) обеспечивают наименьший уровень. Использование в схеме 6 конденса-

тора большой емкости ($C = 1750$ мкФ) позволило дополнительно снизить в 2–2,2 раза амплитуду гармоники тока с частотой 300 Гц.

В ходе исследования было также установлено, что тип конденсатора в сглаживающем фильтре, построенном по схеме 1 (рис. 3.20, а), оказывает значительное влияние на спектральные характеристики электрического тока в ПГО. Применение высокочастотных пленочных конденсаторов К73-17 общей емкостью 8 мкФ по сравнению с низкочастотными конденсаторами МБП той же емкости позволило снизить амплитуду характерного пика основных гармоник тока в 2,75 раза (рис. 3.18 и 3.21).

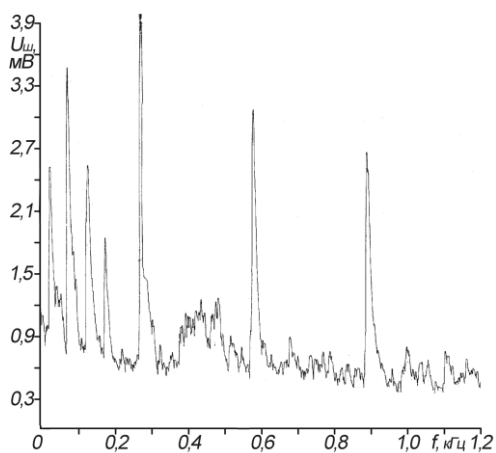


Рис. 3.21. Спектр электрического тока в ПГО, полученный при $U=300$ В, $T_{эл}=80$ °С, $S_{обр}=7,5$ см² и $C=8$ мкФ (К73-17)

Высокий уровень амплитуд гармоник тока, кратных частоте сети, также оказывает негативное влияние на устойчивость процесса ЭИП. Об этом свидетельствует, например, тот факт, что при подключении C -фильтра (схема 1 на рис. 3.20, а) с $C = 1400$ мкФ к выходу выпрямителя, построенного по трехфазной однополупериодной схеме выпрямления переменного тока, на спектрах тока наблюдались настолько значительные уровни гармоник тока, кратных частоте сети, что на их фоне характерный пик основных гармоник тока практически не проявлялся. При этом устойчивость процесса

ЭИП была самой низкой из исследованных условий проведения процесса обработки. В этом случае основное дестабилизирующее влияние на устойчивость процесса ЭИП оказывали низшие гармоники тока, кратные частоте сети.

Таким образом, в условиях ЭИП в спектре электрического тока, протекающего в ПГО, гармоники тока по амплитуде распределены неравномерно в диапазоне частот от 0,01 до 10 кГц. Гармоники с наибольшими амплитудами сосредоточены в полосе частот от 0,01–0,02 до 0,9–1,2 кГц. На частотах свыше 0,9–1,2 кГц спектры тока подобны спектру белого шума с низким уровнем амплитуд спектральных составляющих. В областях частот 0,05–0,15 кГц и 0,4–0,7 кГц основные гармоники тока сосредоточены в виде совокупных пиков, амплитуда которых зависит от условий проведения процесса обработки. Увеличение температуры электролита, напряжения обработки, площади обрабатываемой поверхности и принудительное перемешивание электролита приводят к росту амплитуды совокупного пика основных гармоник тока в области частот от 0,4 до 0,7 кГц. Амплитуды совокупных пиков основных гармоник и гармоник тока, кратных частоте сети, зависят также от параметров выходного сглаживающего фильтра источника технологического тока. Повышение уровня основных гармоник и гармоник тока, кратных частоте сети, оказывает негативное влияние на устойчивость процесса ЭИП. Уровень гармоник электрического тока в спектре шума зависит от условий проведения процесса обработки, причем наибольший уровень этих спектральных составляющих характерен для режимов электролитно-плазменного нагрева и электролитно-разрядного.

3.2. Основные закономерности механизма съема металла при электроимпульсном полировании сплавов на основе железа, хрома и никеля

В условиях ЭИП механизм формирования топографии включает в себя комплекс взаимосвязанных физико-химических процессов, которые на сегодняшний день мало изучены. В разделе 1.3.2 показано, что в настоящее время существует несколько гипотез о механизме съема металла с обрабатываемой поверхности, которые априори базируются на опыте электроэрозионной обработки и ЭХП. По

нашему мнению, основанному на установленных закономерностях электрической проводимости ПГО, приведенных в разделе 3.1, и экспериментальных данных, представленных в работах [233, 286–288, 291–293, 317–326], изучение механизма съема металла в условиях ЭИП должно проводиться с позиций современных общепринятых представлений о процессах анодного растворения металлов и сплавов.

Известно [327], что при внешней поляризации анодное растворение металлов и сплавов в водных растворах протекает в стационарных условиях только в том случае, если скорость образования на поверхности анода адсорбционных, фазовых или адсорбционно-фазовых пленок оксидов или других соединений меньше или равна скорости их удаления с поверхности. Это характерно для области активного растворения металла (область *АС* на рис. 1.1). Так же известно [40, 42, 328], что анодное растворение протекает с участием компонентов раствора, чаще всего анионов электролита или молекул растворителя, которые могут адсорбироваться на поверхности металла. При этом адсорбция анионов может быть как стимулирующей, так и ингибирующей стадией процесса растворения. В общем случае при анодном растворении сплавов независимо от их природы (твердый раствор, интерметаллические соединения или смеси разных фаз) может происходить селективное растворение компонентов сплава, которое проявляется в том, что происходит преимущественное растворение более электроотрицательных компонентов сплава [327]. Однако анодные процессы, обеспечивающие съем металла и формирование качества обрабатываемой поверхности, в условиях ЭИП практически не изучены. По этой причине для установления механизма и основных закономерностей съема металла при ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля было необходимо провести экспериментальные исследования, которые позволили бы установить степень влияния состава и концентрации раствора электролита и технологических режимов ЭИП на выход металла по току, морфологию, микроструктуру, фазовый и химический состав поверхности.

3.2.1. Исследование выхода металла по току в условиях электроимпульсного полирования

Исследование выхода металла по току выполнялось по методике, приведенной в разделе 2.3.4. Выход по току в расчете на Fe^{2+} рассчитывался по формуле (2.9) и определялся в зависимости от концентрации хлорида аммония в водном растворе в диапазоне от 1,0 до 9,0 масс.% при напряжении обработки 310 В и температуре электролита 70 °С, а также от напряжения обработки в диапазоне от 250 до 340 В при температуре электролита 70 °С и от температуры электролита в диапазоне от 50 до 90 °С при напряжении обработки 320 В в 2,5%-м водном растворе хлорида аммония [321, 329]. Значение электрохимического эквивалента для Fe^{2+} принято равным $q_{\text{Fe}^{2+}}=1,042$ г/А·ч [41].

На рис. 3.22 представлена зависимость выхода по току $ВТ_{\text{Fe}^{2+}}$ от концентрации хлорида аммония при ЭИП стали 20.

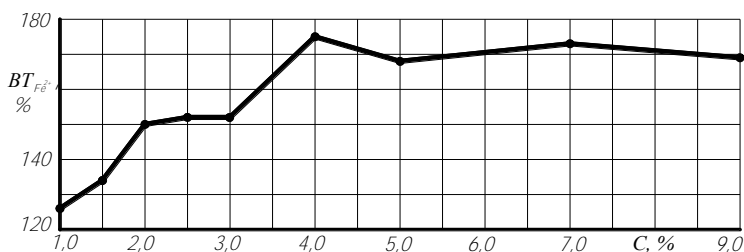


Рис. 3.22. Зависимость выхода металла по току от концентрации хлорида аммония в водном растворе

Как видно из графика, при повышении в растворе концентрации хлорида аммония на каждые 0,5 масс.% в диапазоне от 1,0 до 4,0 масс.% значение выхода по току монотонно возрастает в среднем на 10 % и достигает максимума для 4,0%-й концентрации, для которой выход по току на 39 % выше по сравнению с 1,0%-м раствором. При дальнейшем повышении концентрации выход по току незначительно снижается. Так, для 9,0%-го раствора хлорида аммония он на 4% ниже по сравнению с 4,0%-м раствором.

На диаграммах, представленных на рис. 3.23 и 3.24, показаны зависимости выхода по току соответственно от напряжения обработки и температуры электролита при ЭИП сталей 10; 35 и У8А.

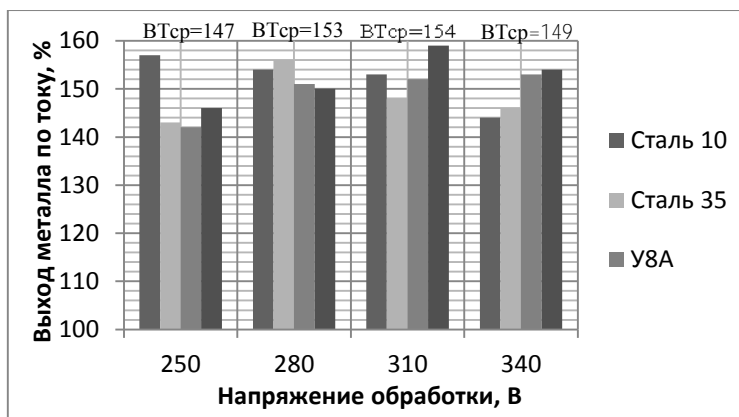


Рис. 3.23. Зависимость выхода по току от напряжения обработки

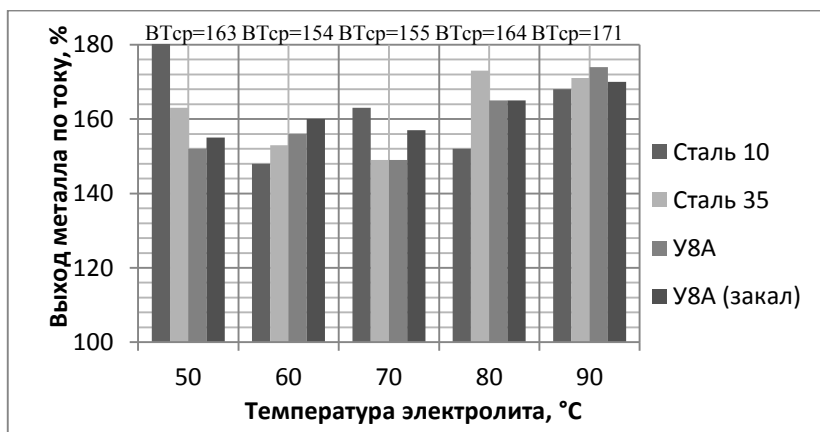


Рис. 3.24. Зависимость выхода по току от температуры электролита

Из данных, представленных на рис. 3.23 и 3.24, следует, что напряжение обработки в диапазоне от 250 до 340 В и температура электролита в диапазоне от 50 до 90 °С в пределах погрешности

эксперимента на выход по току влияют несущественно. Эти факты, на первый взгляд, вступают в противоречие с теорией анодного поведения металлов [268, 327, 328]. Согласно [327], с ростом анодной поляризации растворение металлов в водных растворах последовательно переходит из кинетической области в область смешанной кинетики и далее в диффузионную область. В кинетической области повышение температуры электролита обычно приводит к росту скорости анодного растворения металла и величины выхода по току, который, как правило, не превышает 100 %. При этом скорость растворения металла не зависит от скорости потока электролита.

В области смешанной кинетики анодная плотность тока незначительно зависит от потенциала анода и температуры электролита, в то время как в диффузионной области эти зависимости отсутствуют вовсе. Для этих областей характерно низкое значение выхода металла по току. При этом скорость анодного растворения металла, с одной стороны, зависит от скорости потока электролита при наличии диффузионных ограничений в электролите, а, с другой стороны, не зависит в случае, когда массоперенос, лимитирующий скорость анодного растворения, протекает в пленках, покрывающих поверхность анода. Эти пленки являются продуктами анодных реакций, в том числе взаимодействия катионов кристаллической решетки металла с молекулами воды и анионами электролита и последующих электрохимических и химических реакций [34, 35, 47, 69, 327, 328].

При ЭИП в диапазоне напряжений обработки от 200 до 350 В обрабатываемый металл практически мгновенно из областей активного и пассивного растворения, а также из области перепассивации, если она характерна для данного металла, попадает в область активного выделения кислорода (область EL на рис. 1.1). Учитывая характер зависимостей силы электрического тока от температуры электролита и напряжения обработки (рис. 3.25), а также наличие влияния скорости потоков электролита на величину съема металла в условиях ЭИП [205, 223, 240, 243, 245], можно сделать вывод о том, что процесс анодного растворения металла в условиях ЭИП протекает в переходной области гетерогенных процессов.

Известно [327, 328], что диффузионные ограничения могут быть вызваны как подводом электроактивного вещества в зону реакции, так и отводом из нее продуктов реакции. При ЭИП, благодаря кон-

векции, потокам электролита, вызванным движением ионов электролита в электрическом поле, и самоорганизованным гидродинамическим потокам в электролите электролит перемешивается в электролитической ванне, причем особенно интенсивно в прианодной области. Тем самым снимаются диффузионные ограничения, связанные с массопереносом электроактивного вещества в электролите. Следовательно, в условиях ЭИП диффузионные ограничения могут возникнуть в результате массопереноса через ПГО и в поверхностных пленках, покрывающих анод, если массоперенос, лимитирующий скорость анодного растворения протекает в пленках. Следует отметить, что после ЭИП в электролите с концентрацией хлорида аммония от 1,0 до 3,5 масс.% поверхность образцов из стали 20 приобретала яркий металлический блеск. Повышение концентрации, начиная с 4,0 масс.%, приводит к снижению блеска поверхности, которая приобретает матовый светло-серый оттенок. При этом выход по току незначительно снижается (рис. 3.22). Эти факты указывают на то, что при определенной концентрации хлорида аммония преобладающими диффузионными ограничениями, лимитирующими скорость анодного растворения низколегированных углеродистых сталей, становятся ограничения в поверхностных пленках.

Структура и толщина ПГО также являются одними из основных факторов, влияющих на диффузионные ограничения в условиях ЭИП. При ЭИП низколегированных углеродистых сталей влияние температуры электролита и напряжения обработки на толщину ПГО, силу тока и съём металла различно [205, 222, 223, 233, 270, 276]. Повышение температуры электролита в диапазоне от 50 до 90 °С приводит к увеличению толщины ПГО, к ее турбулизации и, как следствие, к пропорциональному снижению силы тока и удельного съёма металла с поверхности (рис. 3.25 и 3.26, а), в то время как напряжение обработки в диапазоне от 250 до 340 В на силу тока и удельный съём металла влияет незначительно (рис. 3.25 и 3.26, б). Совокупным действием этих факторов можно объяснить отсутствие заметного влияния напряжения обработки и температуры электролита на выход металла по току при ЭИП сталей 10; 35 и У8А. Полученные данные хорошо согласуются с данными, приведенными в работах [109, 112, 123, 124, 224].

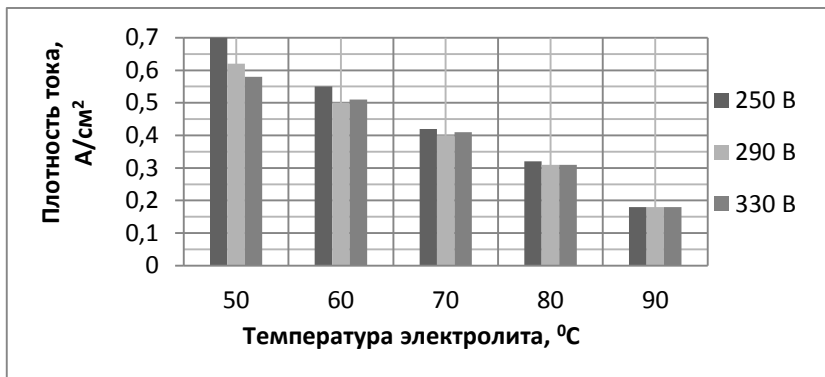


Рис. 3.25. Зависимость плотности тока от температуры электролита и напряжения обработки (сталь 20; 2%-й водный раствор хлорида аммония)

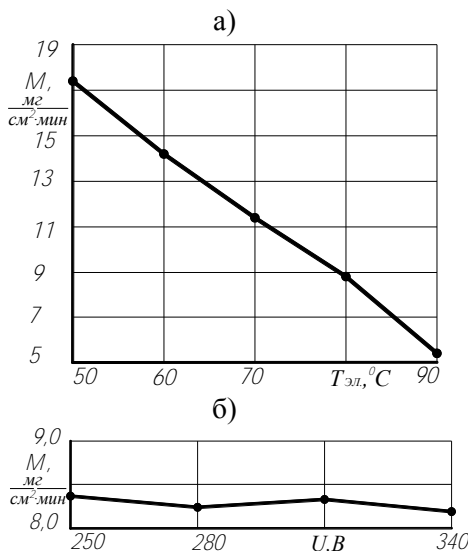


Рис. 3.26. Зависимость удельного съема металла от температуры электролита (а) и напряжения обработки (б) при ЭИП стали 20:
 а – $C=2,5$ масс.% хлорида аммония; $U=320$ В;
 б – $C=1,5$ масс.% хлорида аммония; $T_{эл}=70$ °C

Таким образом, при ЭИП низколегированных углеродистых сталей 10; 20; 35 и У8А, независимо от микроструктуры и количественного содержания углерода, влияние технологических режимов обработки (напряжения обработки и температуры электролита) на выход металла по току в расчете на Fe^{2+} несущественно. Следовательно, механизм анодного растворения для этих сталей имеет одинаковый характер. Высокие значения выхода по току, значительно превышающие 100 %, указывают на то, что механизм анодного растворения железа при ЭИП низколегированных углеродистых сталей включает электрохимическую и химическую стадии, а поверхностные пленки имеют незначительную толщину и обладают высокой ионной проводимостью.

3.2.2. Влияние электроимпульсного полирования на микроструктуру и фазовый состав поверхности коррозионностойких сталей

Микроструктура и фазовый состав поверхности коррозионностойких сталей 20X13 и 12X18Н10Т исследовались по методикам, приведенным в разделе 2.3.7. Образцы обрабатывались на режимах, приведенных в табл. 2.5 и 2.6. В качестве электролита использовались однокомпонентный водный раствор сульфата аммония и двухкомпонентный водный раствор, включавший сульфат аммония и лимонную кислоту. Использование двухкомпонентного раствора по авторскому свидетельству 1665727 [317] обусловлено тем, что введение в раствор сульфата аммония лимонной кислоты в количестве 0,5–3,0 масс.% позволяет повысить удельный съём металла при ЭИП коррозионностойких сталей и может дать дополнительную информацию о возможном механизме анодного растворения коррозионностойких сталей.

Сталь 20X13. Сравнительный анализ полученных рентгенограмм показал, что все образцы (см. табл. 2.5), включая образец-свидетель 1, имеют подобные рентгенограммы [270, 291, 292]. На линиях (200), (211) и (220) у образца-свидетеля 1 наблюдается тетрагональное расщепление вследствие частичного образования мартенсита, который представляет собой сильно пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе с объемно-центрированной тетра-

гональной решеткой. Линии других фаз отсутствуют, т.к. их содержание на поверхности образца недостаточно для получения дифракционной картины, а массовые коэффициенты ослабления рентгеновских лучей выше, чем у α -железа. В табл. 3.3 приведены межплоскостные расстояния и фазовый состав поверхности образца 2. Видно, что все рентгеновские линии принадлежат одной фазе – α -железу или ферриту, который представляет собой твердый раствор углерода в α -железе с объемно-центрированной кубической решеткой.

Таблица 3.3 – Межплоскостные расстояния и фазовый состав поверхности образца 2

Угол дифракции, 2θ	Межплоскостное расстояние, d	Фаза
44,5	2,036	α -железо
65,1	1,433	α -железо
82,4	1,170	α -железо
99,0	1,010	α -железо
116,1	0,9088	α -железо

Сравнение интенсивности рентгеновских линий с одинаковыми индексами у образцов после ЭИП с аналогичными линиями образца-свидетеля позволило установить, что обработка при напряжении 250 В в однокомпонентном растворе приводит к растворению преимущественно ферритной составляющей стали, в то время, как мартенситная фаза растворяется менее интенсивно. При напряжении обработки 300 В скорость растворения феррита повышается, однако интенсивность мартенситных линий на рентгенограмме также несколько возрастает. При напряжении обработки 450 В растворяются как феррит, так и мартенсит, но феррит растворяется более интенсивно. Для исследованных режимов ЭИП растворение α -железа происходит неравномерно по различным кристаллографическим плоскостям [270, 292].

Введение лимонной кислоты в водный раствор сульфата аммония позволило выровнять скорости растворения феррита и мартен-

сита по всем кристаллографическим плоскостям. Об этом свидетельствует тот факт, что при напряжениях обработки 250 и 300 В мартенситное расщепление линий на рентгенограммах не исчезает. Следовательно, феррит и мартенсит растворяются с одинаковыми скоростями. При напряжении обработки 450 В вследствие активного растворения одновременно по всем кристаллографическим плоскостям расщепление линий исчезает, но положение линий не изменяется.

При изучении поверхности образцов 2–7 (см. табл. 2.5) с помощью оптического микроскопа в микролунках, распределенных по всей поверхности, обнаружены мелкие светлые зерна (рис. 3.27, а).

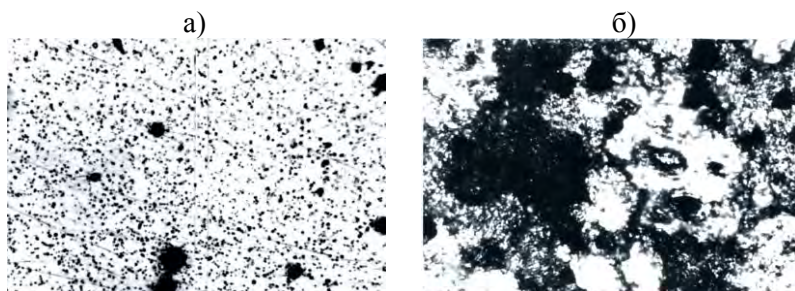


Рис. 3.27. Топография (а, x500) и микроструктура (б, x800) стали 20X13

Для определения фазового состава этих зерен был проведен металлографический анализ исходной поверхности стали 20X13. При избирательном электрохимическом травлении в течение 10 с при напряжении 5 В и силе тока 1 А в 5%-м водном растворе хлорида натрия на поверхности образца образуются микролунки, внутри которых видны светлые кристаллы правильной кубической или треугольной формы подобные тем, какие обнаружены в микролунках на поверхности после ЭИП.

При последующей обработке в растворе А, содержащем 1–25 г хлорида железа, 1–50 мл соляной кислоты и 100–120 мл воды, мелкие светлые зерна избирательно окрашивались. Повторная обработка поверхности образца в растворе Б, содержащем 20 г хлорида железа, 1–2 мл азотной кислоты и 100 мл соляной кислоты, позволила выявить структуру феррита и мартенсита. При исследовании стали

20X13 оптическим методом других структурных составляющих не установлено. После дополнительного избирательного травления в растворе Б с поверхности образца была растворена часть феррита и мартенсита. При этом на поверхности образца остались мелкие светлые кристаллы и крупные зерна правильной формы (см. рис. 3.27, б). После этого была получена рентгенограмма, на которой появились линии, не относящиеся к α -железу и мартенситу. Эти структурные составляющие, фазовый состав которых приведен в табл. 3.4, и дают рентгеновскую дифракционную картину. Следовательно, мелкие светлые кристаллы, расположенные внутри зерен феррита и мартенсита, представляют собой цементит Fe_3C , а крупные зерна правильной формы – карбиды хрома Cr_{23}C_6 [323].

Таблица 3.4 – Фазовый состав карбидных составляющих структуры стали 20X13

Угол дифракции, 2θ	Межплоскостное расстояние, d	Фаза
38,16	2,360	Fe_3C ; Cr_{23}C_6
39,45	2,280	Fe_3C
40,50	2,220	Fe_3C
41,85	2,159	Cr_{23}C_6
44,50	2,030	Fe_3C ; Cr_{23}C_6
48,70	1,866	Fe_3C ; Cr_{23}C_6
51,00	1,786	Fe_3C ; Cr_{23}C_6

Таким образом, ЭИП стали 20X13 сопровождается интенсивным питтингообразованием. Центрами питтингов является цементит, вокруг которого интенсивно растворяется ферритная матрица (см. рис. 3.27, а) [270, 286, 292]. Этот эффект наиболее выражен при ЭИП при напряжении обработки 450 В.

Сталь 12X18Н10Т. Фазовый состав образца-свидетеля 8 (табл. 2.6) приведен в табл. 3.5. Видно, что основной фазой в стали 12X18Н10Т является γ -железо или аустенит, который представляет собой твердый раствор внедрения углерода в γ -железе с гранецен-

трированной кубической решеткой. Второй фазой является α -фаза, т.е. феррит или мартенсит [270, 291, 292].

Таблица 3.5 – Межплоскостные расстояния и фазовый состав поверхности образца-свидетеля 8 из стали 12X18H10T

Угол дифракции, 2θ	Межплоскостное расстояние, d	Фаза
51,20	2,078	γ -железо
52,33	2,030	α -железо
59,80	1,800	γ -железо
89,66	1,270	γ -железо
111,45	1,080	γ -железо

Сравнительный анализ дифракционных линий у образцов 9–12 (см. табл. 2.6) показал, что после ЭИП исчезают линии α -железа. Интенсивность линий γ -железа у образцов 9 и 11, обработанных при напряжении 250 В как в однокомпонентном (образец 9), так и в двухкомпонентном (образец 11) растворах, несколько возрастает. Следовательно, аустенит растворяется с меньшей интенсивностью по сравнению с α -железом, что приводит к обогащению поверхности γ -фазой. При ЭИП в обоих электролитах при напряжении обработки 450 В интенсивность линий γ -железа снижается, что говорит о том, что начинается растворение зерен аустенита, причем растворение γ -железа происходит с разной скоростью по разным кристаллографическим плоскостям. Этот эффект связан с различной плотностью их упаковки, а, следовательно, с разным электрохимическим потенциалом.

Исследование поверхности образцов с помощью оптического микроскопа показало, что при ЭИП стали 12X18H10T на поверхности избирательно окрашиваются карбиды титана (рис. 3.28, а) [236, 270, 286]. Обработка при напряжении 450 В приводит к активному растворению зерен α - и γ -железа. Совокупная топография соответствует рельефу растворенных зерен феррита и аустенита (см. рис. 3.28, б).

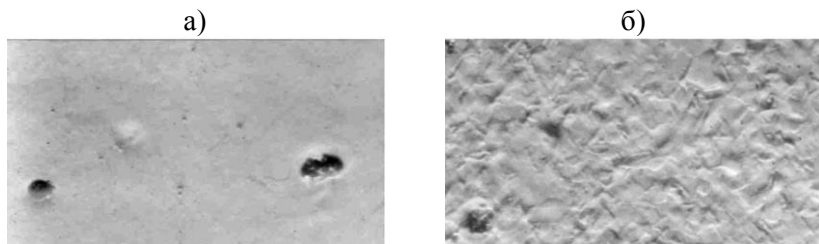


Рис. 3.28. Топография стали 12X18H10T после ЭИП при напряжении обработки 250 В (а) и 450 В (б) (x400)

Таким образом, при ЭИП в однокомпонентном водном растворе наблюдается селективное растворение структурных составляющих коррозионностойких сталей – феррита у стали 20X13 и мартенсита у стали 12X18H10T. Для выравнивания скоростей растворения основных структурных составляющих целесообразно использовать двухкомпонентный раствор, а обработку проводить при напряжении 250–300 В.

3.2.3. Влияние электроимпульсного полирования на химический состав сверхтонкого поверхностного слоя коррозионностойких сталей

Исследование химического состава сверхтонкого (толщиной до 20 Å) поверхностного слоя выполнялось на образцах 1–12 (табл. 2.5 и 2.6) из коррозионностойких сталей 20X13 и 12X18H10T по методике, приведенной в разделе 2.3.7. В табл. 3.6 и 3.7 представлены данные о химическом составе поверхности соответственно сталей 20X13 и 12X18H10T [287, 288], из которых следует, что сверхтонкие пленки на поверхности коррозионностойких сталей имеют сложный химический состав. На поверхности образцов-свидетелей 1 и 8 содержание кислорода для сталей 20X13 и 12X18H10T соответственно равно 11,5 и 9,9 масс.% или 51,1 и 52,0 ат.%. Кроме оксидов хрома на поверхности обнаружены сложные железо-хромовый и кальций-хромовый оксиды. При этом общее количество оксидов разного химического состава для сталей 20X13 и 12X18H10T соответственно равно 32,4 масс.% и 40,3 масс.%.

Таблица 3.6 – Распределение химических элементов и соединений на поверхности стали 20X13 по атомному (ат.%, в числителе) и массовому (масс.%, в знаменателе) составу

Химические элементы и соединения	Номер образца						
	1 (образец-свидетель)	2	3	4	5	6	7
C 1S ½	<u>13,4</u> 2,3	<u>19,3</u> 3,6	<u>14,2</u> 2,2	<u>44,3</u> 11,0	<u>47,4</u> 14,7	<u>13,6</u> 2,3	<u>10,0</u> 1,8
O 1S ½	<u>51,1</u> 11,5	<u>38,4</u> 9,5	<u>43,1</u> 10,0	<u>28,0</u> 9,4	<u>27,2</u> 11,0	<u>40,0</u> 9,2	<u>41,0</u> 9,6
Cr ₂ O ₃	<u>3,5</u> 3,4	<u>5,0</u> 5,6	<u>3,5</u> 3,7	<u>2,1</u> 3,2	<u>4,0</u> 5,4	<u>5,6</u> 5,9	<u>5,4</u> 5,8
Cr ₂ N	–	<u>5,0</u> 2,9	<u>4,2</u> 2,4	<u>2,8</u> 2,4	<u>3,7</u> 3,6	<u>5,7</u> 3,1	<u>5,0</u> 2,8
NaFe(CH) ₅ (NO)	<u>11,1</u> 27,0	<u>7,5</u> 20,2	<u>7,5</u> 19,2	<u>4,5</u> 16,5	<u>4,2</u> 19,0	<u>7,7</u> 19,4	<u>8,5</u> 19,2
Na ₂ Fe(CH) ₅ H ₂ O	<u>10,5</u> 26,8	<u>7,1</u> 20,2	<u>8,1</u> 22,0	<u>5,2</u> 19,5	<u>2,6</u> 7,6	<u>7,8</u> 20,8	<u>8,2</u> 21,0
Fe ₂ Cr ₂ O ₄	<u>10,4</u> 29,0	<u>6,6</u> 20,4	<u>7,7</u> 23,0	<u>5,2</u> 21,2	<u>3,9</u> 20,0	<u>7,5</u> 21,5	<u>8,3</u> 22,3
FeF ₂	–	<u>6,0</u> 8,7	<u>7,0</u> 9,7	<u>4,6</u> 8,5	<u>3,6</u> 8,7	<u>6,5</u> 8,7	<u>7,8</u> 8,7
FeF ₃	–	<u>5,1</u> 8,9	<u>4,7</u> 7,8	<u>3,5</u> 8,3	<u>3,4</u> 10,0	<u>5,6</u> 9,1	<u>5,8</u> 8,8

Анализ полученных данных показал, что после ЭИП концентрация кислорода на поверхности стали 20X13 снижается в среднем на 17,6 масс.% (или на 28,9 ат.%) и на 35,1 масс.% (или на 27,3 ат.%) на поверхности стали 12X18H10T. Количество оксидов изменяется более сложным образом – количество оксидов хрома возрастает в среднем на 45,0 масс.% для стали 20X13 и на 90,5 масс.% для стали 12X18H10T. Однако количество железо-хромового оксида снижается для обеих сталей: в среднем на 35,5 масс.% для стали 20X13 и на 50,8 масс.% для стали 12X18H10T. После ЭИП концентрация кальций-хромового оксида на поверхности стали 12X18H10T возрастает в среднем на 57,8 масс.%.

Таблица 3.7 – Распределение химических элементов и соединений на поверхности стали 12X18H10T по атомному (ат.%, в числителе) и массовому (масс.%, в знаменателе) составу

Химические элементы и соединения	Номер образца				
	8 (образец – свидетель)	9	10	11	12
C 1S ½	<u>7,7</u> 1,1	<u>11,0</u> 1,7	<u>18,4</u> 3,0	<u>8,2</u> 1,1	<u>8,0</u> 1,0
O 1S ½	<u>52,0</u> 9,9	<u>40,3</u> 8,1	<u>38,0</u> 8,3	<u>39,0</u> 7,2	<u>34,0</u> 5,7
Cr ₂ O ₃	<u>3,6</u> 6,6	<u>8,0</u> 15,0	<u>6,0</u> 13,0	<u>8,2</u> 14,5	<u>6,3</u> 7,8
Cr ₂ N	<u>5,0</u> 7,1	<u>8,9</u> 13,0	<u>7,4</u> 13,0	<u>8,4</u> 11,2	<u>7,4</u> 13,5
NaFe(CH) ₅ (NO)	<u>9,6</u> 20,1	<u>5,2</u> 11,3	<u>4,8</u> 11,5	<u>6,0</u> 12,0	<u>7,7</u> 14,0
Na ₂ Fe(CH) ₅ H ₂ O	<u>8,3</u> 20,0	<u>5,1</u> 12,0	<u>4,9</u> 11,3	<u>5,9</u> 12,3	<u>7,3</u> 14,0
Fe ₂ Cr ₂ O ₄	<u>7,0</u> 27,0	<u>4,7</u> 16,5	<u>4,4</u> 17,0	<u>5,6</u> 18,2	<u>6,8</u> 20,0
FeF ₂	–	<u>4,3</u> 5,5	<u>4,3</u> 5,5	<u>5,0</u> 5,5	<u>6,0</u> 6,0
FeF ₃	–	<u>3,8</u> 5,6	<u>3,7</u> 5,7	<u>4,4</u> 5,8	<u>5,5</u> 6,5
CaCrO ₄	<u>2,5</u> 4,8	<u>4,0</u> 7,8	<u>3,5</u> 7,5	<u>4,7</u> 8,5	<u>4,2</u> 6,5
Ti	<u>0,7</u> 0,5	<u>0,7</u> 0,4	<u>0,7</u> 0,5	<u>0,9</u> 0,5	<u>1,1</u> 0,5
TiO	<u>0,9</u> 0,7	<u>0,9</u> 0,7	<u>1,0</u> 0,9	<u>1,1</u> 0,6	<u>1,2</u> 0,8
Ni	<u>1,3</u> 1,0	<u>2,0</u> 1,4	<u>1,7</u> 1,4	<u>1,7</u> 1,4	<u>3,0</u> 2,5
NiO	<u>1,4</u> 1,2	<u>1,1</u> 1,0	<u>1,2</u> 1,2	<u>1,2</u> 1,2	<u>1,5</u> 1,2

В то же время количество оксидов титана и никеля на поверхности стали 12X18H10T практически не изменяется. Очевидно, что выявленные закономерности связаны с кинетикой образования и растворения оксидов. Если скорость образования оксида выше ско-

рости его растворения, то количество оксида на поверхности будет возрастать и наоборот, если скорость растворения оксида выше скорости его образования, то его количество на поверхности будет снижаться. При равенстве скоростей образования и растворения оксида его количество на поверхности будет неизменно.

Интересным фактом является обнаружение фторидов двух- и трехвалентного железа и нитрида хрома в сверхтонких поверхностных пленках на электроимпульсно полированной поверхности для обеих марок сталей. Суммарное количество фторидов железа и нитрида хрома достаточно большое и не зависит от состава раствора электролита и величины напряжения обработки. Так, концентрация фторидов железа и нитрида хрома на поверхности стали 20Х13 составляет в среднем соответственно 17,7 масс.% (или 5,3 ат.%) и 2,9 масс.% (или 4,4 ат.%), для стали 12Х18Н10Т – соответственно 11,6 масс.% (или 4,6 ат.%) и 12,7 масс.% (или 8,0 ат.%). Образование на поверхности фторидов железа и нитрида хрома возможно в том случае, если в процессе анодного растворения сталей принимают участие фторид и азотсодержащие анионы электролита. Одним из возможных объяснений образования фторидов железа и нитрида хрома может быть наличие фтор и азотсодержащих примесей в химических реактивах, использованных для приготовления растворов электролита.

3.2.4. Влияние электроимпульсного полирования на морфологию и химический состав поверхности низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей

Исследование выполнялось на образцах из сталей 20 и 20Х13 по методике, приведенной в разделе 2.3.7. Определялся общий элементный химический состав поверхности, химический состав в пределах одного зерна и химический состав на границе зерен на площади около 1 мкм² [286].

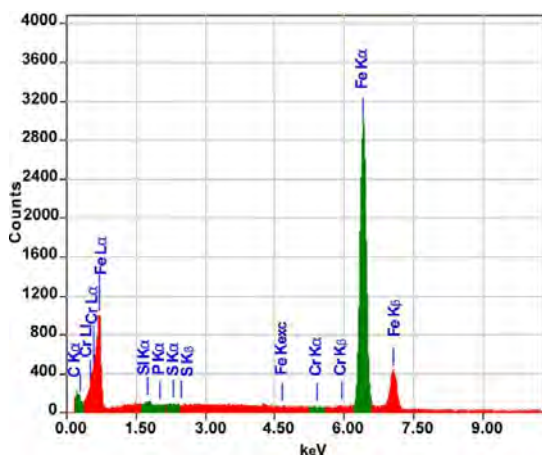
Сталь 20. Исследовались образцы, объединенные в три группы:

- образцы после ЭИП;
- образцы, обработанные в квазикоммутационном режиме;

- образцы с переходной областью на границе раздела «электролит–воздух», полученной при ЭИП образцов, частично погруженных в электролит.

Образцы обрабатывались в 2%-м водном растворе хлорида аммония. Квазикоммутационный режим обработки моделировался путем принудительного срыва ПГО при быстром погружении в электролит предварительно полированного образца. Продолжительность обработки в квазикоммутационном режиме составляла около 2 с. Последние две группы образцов использовались для моделирования процесса ЭИП в «нестационарных» условиях с целью получения дополнительной информации о возможном механизме анодного растворения конструкционной углеродистой стали 20.

Спектрограмма с элементным химическим составом исходной (шлифованной) поверхности образца представлена на рис. 3.29.



Element	(keV)	mass%	Error%	At%	Compound	mass% K
Si K*	1.739	0.10	0.34	0.20		0.0530
S K*	2.307	0.03	0.24	0.06		0.0306
Cr K*	5.411	0.07	0.41	0.07		0.0803
Fe K	6.398	99.80	0.60	99.67		99.8361
Total		100.00		100.00		

Рис. 3.29. Спектрограмма с химическим составом исходной поверхности

Структура стали 20 состоит из смеси феррита и перлита, представляющего собой эвтектоидную смесь двух фаз – феррита и цемента [219]. Количественный химический анализ исходной поверхности не выявил на ней наличия углерода, хотя на спектрограмме линия углерода низкой интенсивности присутствует. Этот факт можно объяснить обезуглероживанием тонкого поверхностного слоя при шлифовании образца на плоскошлифовальном станке.

На рис. 3.30 представлена морфология поверхности образца после ЭИП. Анализ морфологии поверхности показал, что в процессе ЭИП происходит относительно равномерное растворение феррита (светлые кристаллиты) и перлита (более темные кристаллиты). Однако количественный химический анализ выявил на поверхности образца аномально высокую концентрацию углерода (2,07 масс.%) (рис. 3.31, *a*). Данный факт указывает на селективное растворение структурных составляющих перлита – ферритная фаза перлита растворяется более интенсивно, что приводит к обогащению перлитной фазы цементитом и объясняет высокое содержание углерода на полированной поверхности. Накопление на поверхности избыточного количества углерода возможно также в результате обезуглероживания тонких приповерхностных слоев стали за счет диффузии углерода к поверхности, обусловленной анодной обработкой [330, 331].

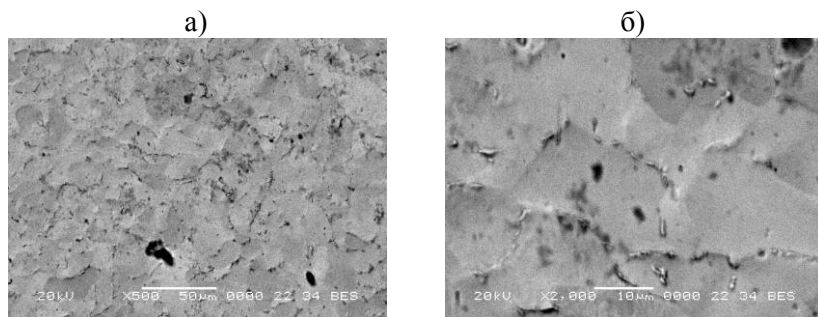


Рис. 3.30. Морфология поверхности образца из стали 20 после ЭИП:
a – $\times 500$; *б* – $\times 2000$

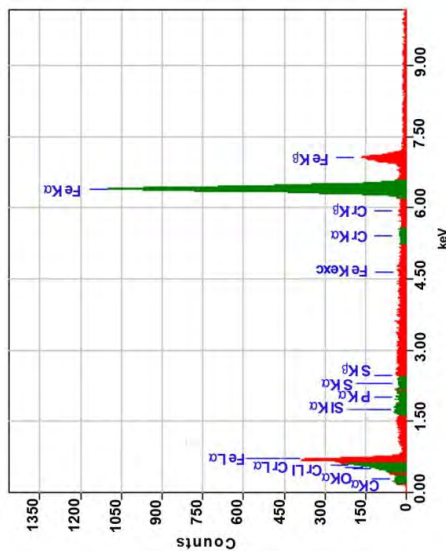
Известно [40, 43, 45, 327], что в естественных условиях поверхность любого металла или сплава покрыта адсорбционными, фазовыми или адсорбционно-фазовыми пленками, имеющими различ-

ную природу. Проведенный количественный анализ химического состава не выявил наличие кислорода на исходной и полированной поверхностях. Однако анализ спектрограмм показал, что на спектре исходной поверхности линия кислорода отсутствует (рис. 3.29), в то время как на спектре поверхности после ЭИП линия кислорода низкой интенсивности присутствует (рис. 3.31, *a*). Эти данные указывают на то, что содержание кислорода на полированной поверхности несколько выше по сравнению с исходной поверхностью, но толщина кислородсодержащих поверхностных пленок в обоих случаях столь мала, что количественное содержание кислорода не может быть определено с помощью системы энергодисперсионного химического микроанализа EDX JED-2201, имеющей порог чувствительности 0,1 ат. %.

Цементит, кремний и примеси, сконцентрированные на границах зерен, повышают дефектность кристаллической структуры стали 20. На спектрограмме «дефектной» границы зерен (рис. 3.31, *b*) линия кислорода также отсутствует. Следовательно, адсорбция молекул воды, являющаяся первой стадией анодного растворения металлов [327, 332, 333], на дефектных границах зерен затруднена, что приводит к снижению скорости анодного растворения структурных составляющих дефектных границ зерен по сравнению со скоростью растворения основных фаз кристаллитов, вследствие чего дефектные границы зерен принимают вид валиков, выступающих над поверхностью кристаллитов (рис. 3.30).

На рис. 3.32 представлена морфология поверхности после обработки в квазикоммутационном режиме. Видно, что в условиях квазикоммутационного режима обработки при кратковременном (около 2 с) контакте электролита с обрабатываемой поверхностью, но значительно более продолжительном по сравнению с устойчивым процессом ЭИП, скорости растворения феррита и перлита резко возрастают. Об этом можно судить по существенно увеличившейся высоте валиков на дефектных границах зерен (рис. 3.30 и 3.32). При этом растворение основных фаз стали 20 происходит с разными скоростями по разным кристаллографическим плоскостям – появилась «рябь» на поверхности кристаллитов (рис. 3.32, *b*). Следует отметить, что в квазикоммутационном режиме обработки происходит значительное обезуглероживание тонкого поверхностного слоя,

a)



б)

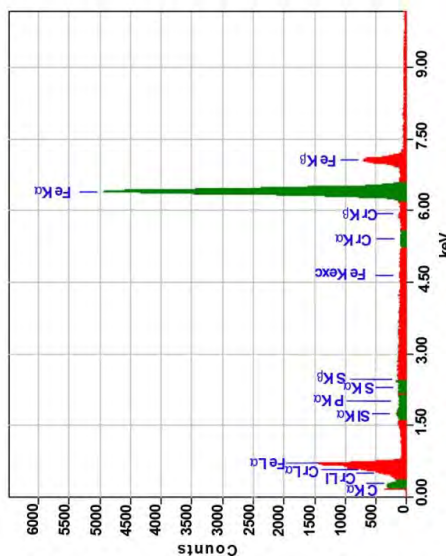


Рис. 3.31. Спектрограмма с химическим составом поверхности (а) и границы зерен (б) образца из стали 20 после ЭИП

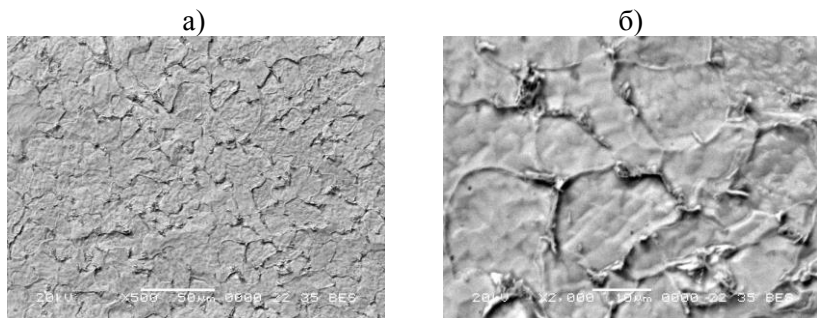
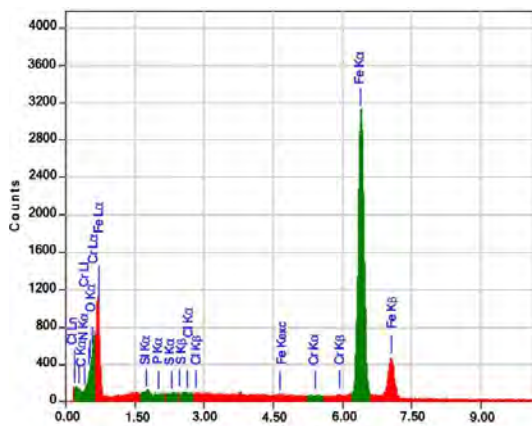


Рис. 3.32. Морфология поверхности образца из стали 20 после обработки в квазикоммутационном режиме:
a – $\times 500$; *б* – $\times 2000$

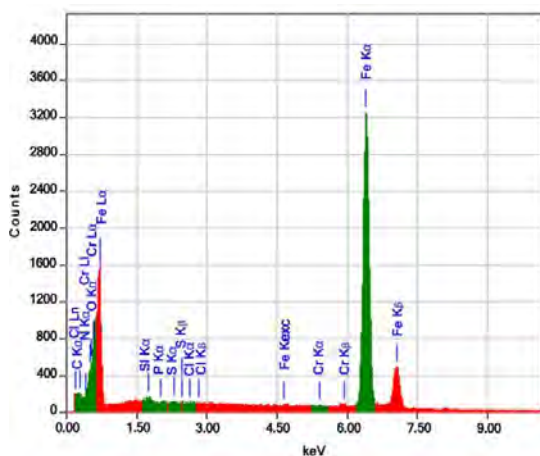
на что указывает спектрограмма поверхности (рис. 3.33), на которой присутствует линия углерода низкой интенсивности, но концентрация углерода на поверхности не превышает 0,1 ат. %.



Element	(keV)	mass%	Error%	At%	Compound	mass% K
Si K*	1.739	0.05	0.32	0.11		0.0285
Cl K*	2.621	0.08	0.22	0.13		0.0792
Fe K	6.398	99.86	0.57	99.76		99.8923
Total		100.00		100.00		

Рис. 3.33. Спектрограмма с химическим составом поверхности после обработки в квазикоммутационном режиме

Как следует из данных, представленных на рис. 3.33 и 3.34, на поверхности в целом и на поверхности дефектных границ зерен концентрация кислорода увеличилась, причем на дефектных границах зерен содержание кислорода достигает значительной величины (0,89 масс.%) (рис. 3.34). Вероятно, это связано с увеличением скорости адсорбции молекул воды или скорости образования оксидных и(или) гидроксидных соединений на поверхности в условиях квазикоммутационного режима обработки.



Element	(keV)	mass%	Error%	At%	Compound	mass% K
C K*	0.277	0.86	0.55	3.77		0.1765
O K*	0.525	0.89	0.42	2.93		1.3894
Si K*	1.739	0.31	0.32	0.59		0.1664
S K*	2.307	0.11	0.23	0.17		0.0943
Cl K*	2.621	0.04	0.23	0.06		0.0380
Cr K*	5.411	0.29	0.40	0.29		0.3523
Fe K	6.398	97.51	0.58	92.19		97.7830
Total		100.00		100.00		

Рис. 3.34. Спектрограмма с химическим составом границы зерен после обработки в квазикоммутационном режиме

Важным фактом, заслуживающим внимания, является появление на спектрограммах линии хлора. Количественный химический анализ выявил достаточно большое содержание хлора как на поверхно-

сти в целом (0,08 масс.%) (рис. 3.33), так и на поверхности дефектных границ зерен (0,04 масс.%) (рис. 3.34).

При ЭИП образца, частично погруженного в электролит, в переходной области на границе раздела «электролит–воздух» водяной пар и газовая фаза выходят из ПГО в атмосферу. В этой области электролит стохастически замыкает ПГО. Целостность ПГО нарушается. При этом объем электролита, контактирующий с поверхностью анода, и продолжительность контакта занимают промежуточные значения между квазикоммутационным режимом обработки и устойчивым процессом ЭИП. На рис. 3.35 представлена морфология, а на рис. 3.36 – спектрограмма с элементным химическим составом поверхности переходной области.

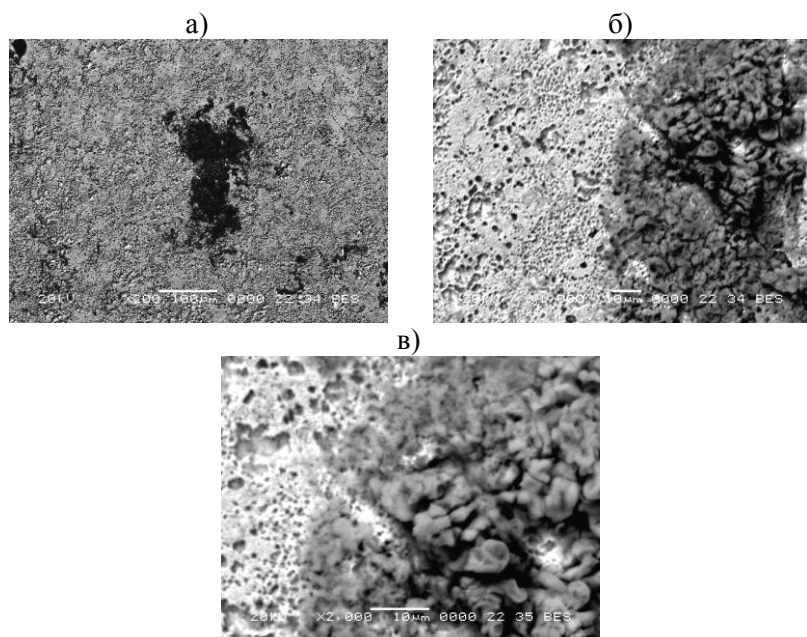
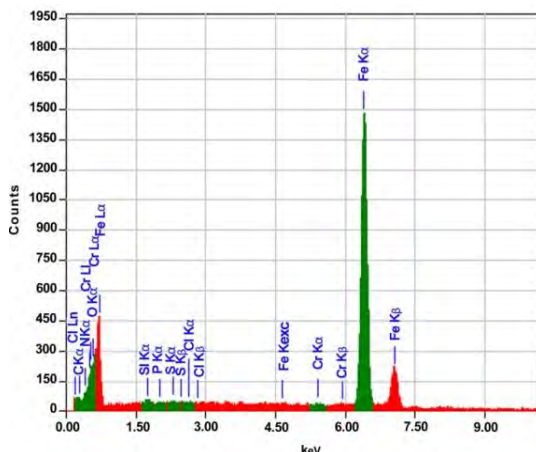


Рис. 3.35. Морфология поверхности переходной области:
x200 (а); x1000 (б); x2000 (в)

На рис. 3.35, а видно, что поверхность переходной области покрыта пленкой темно-серого цвета. Причем наряду с этой пленкой

на поверхности наблюдаются достаточно большие по размеру рыхлые объемные новообразования черного цвета (рис. 3.35, б; в). Структура и целостность пленки темно-серого цвета и объемных новообразований черного цвета неоднородны – под пленками видны светлые участки поверхности. Также видно, что поверхность образца в переходной области покрыта множеством питтингов, имеющих разные размеры (рис. 3.35, б).



Element	(keV)	mass%	Error%	At%	Compound	mass% K
O K *	0.525	2.83	0.40	9.21		4.4581
Si K *	1.739	0.15	0.31	0.29		0.0808
P K *	2.013	0.06	0.31	0.10		0.0466
S K *	2.307	0.05	0.22	0.09		0.0470
Cl K *	2.621	0.10	0.22	0.15		0.0975
Cr K *	5.411	0.13	0.38	0.13		0.1540
Fe K	6.398	96.67	0.56	90.04		95.1161
Total		100.00		100.00		

Рис. 3.36. Спектрограмма с химическим составом переходной области

На рис. 3.37 представлены спектрограммы с элементным химическим составом светлого участка и рыхлого объемного новообразования черного цвета на поверхности переходной области. Концентрация углерода на поверхности в целом (рис. 3.36), на светлом участке (рис. 3.37, б) и в черном новообразовании (рис. 3.37, а) примерно одинакова и не превышает 0,1 ат.%.

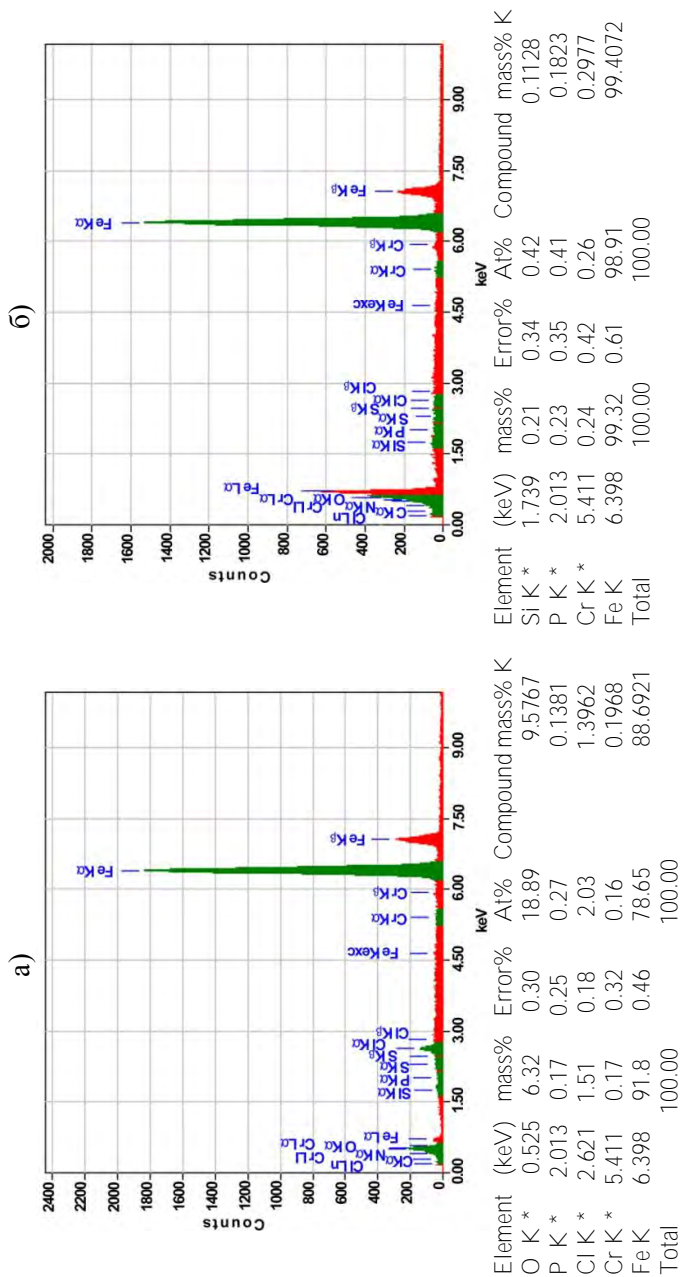


Рис. 3.37. Спектрограмма с химическим составом черного новообразования (а) и светлого участка (б) на переходной области

Данные факты указывают на обезуглероживание поверхности переходной области и селективное растворение феррита в перлитной фазе. Центрами питтингообразования является цементит перлитной фазы, вокруг которого интенсивно растворяются узкие участки ферритной матрицы [292], что способствует легкому удалению цементита и приводит к снижению концентрации углерода на поверхности до уровня менее 0,1 ат. %.

Важной особенностью переходной области является очень высокое содержание кислорода и хлора в поверхностных пленках. Так, концентрации кислорода и хлора на поверхности переходной области в целом составляют соответственно 2,83 и 0,10 масс. % (рис. 3.36), в то время как в черном новообразовании – соответственно 6,32 и 1,51 масс. % (рис. 3.37, а). Следовательно, поверхностные пленки, образующиеся на поверхности переходной области при ЭИП стали 20, имеют оксидную природу и предположительно представляют собой оксид железа FeO черного цвета. При устойчивом проведении процесса ЭИП оксид железа FeO также образуется на поверхности, но в значительно меньшем количестве, на что указывает спектрограмма светлого участка на поверхности, свидетельствующая о наличии кислорода в количестве менее 0,1 ат. % (рис. 3.37, б).

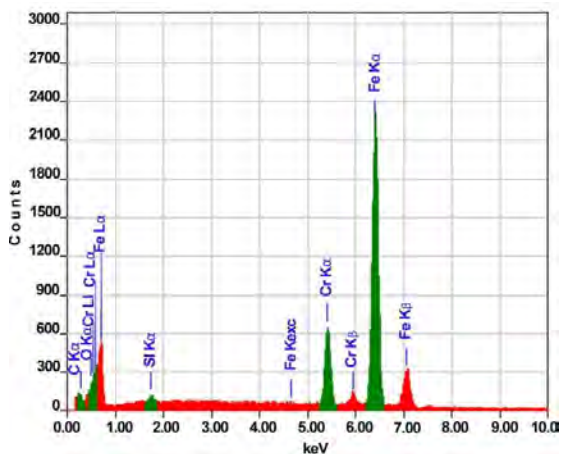
Сталь 20X13. Исследовались образцы, объединенные в две группы:

- образцы после ЭИП;
- образцы с переходной областью на границе раздела «электролит–воздух», полученной при ЭИП образцов, частично погруженных в электролит.

Часть образцов обрабатывалась в однокомпонентном 6%-м водном растворе сульфата аммония, вторая часть – в двухкомпонентном водном растворе, содержащем 6,0 масс. % сульфата аммония и 1,5 масс. % лимонной кислоты. Использование двухкомпонентного раствора обусловлено возможностью получения дополнительной информации о вероятном механизме анодного растворения коррозионностойких сталей.

На рис. 3.38 представлена спектрограмма с элементным химическим составом исходной (шлифованной) поверхности образца. Как было показано в разделе 3.2.2, основными фазами в стали 20X13 являются феррит, цементит и карбиды хрома Cr_{23}C_6 . Следовательно,

именно карбидная фаза дает аномально высокую концентрацию углерода (3,62 масс.%) на исходной поверхности образца. Высокую концентрацию кислорода (0,51 масс.%) можно объяснить окислением железа и хрома на поверхности образца в процессе его шлифования на плоскошлифовальном станке.



Element	(keV)	mass%	Error%	At%	Compound	mass% K
C	K *	0.277	3.62	0.47	14.52	0.8005
O	K	0.525	0.51	0.39	1.55	0.7965
Si	K *	1.739	0.42	0.27	0.72	0.2373
Cr	K	5.411	13.81	0.37	12.80	16.2475
Fe	K	6.398	81.63	0.52	70.41	81.9182
Total		100.00		100.00		

Рис. 3.38. Спектрограмма с химическим составом исходной поверхности

На рис. 3.39 представлена морфология и спектрограмма с элементным химическим составом поверхности образца после ЭИП в однокомпонентном растворе. Наблюдаемая морфология является следствием неравномерного распределения на поверхности карбидной фазы, которая сконцентрирована преимущественно на границах зерен, в то время как в ферритной матрице ее концентрация значительно ниже. В разделе 3.2.2 показано, что при ЭИП вследствие затрудненного растворения карбидной фазы по сравнению с ферритной основой стали 20X13 происходит селективное растворение уз-

ких участков ферритной матрицы, примыкающих к карбидным частицам.

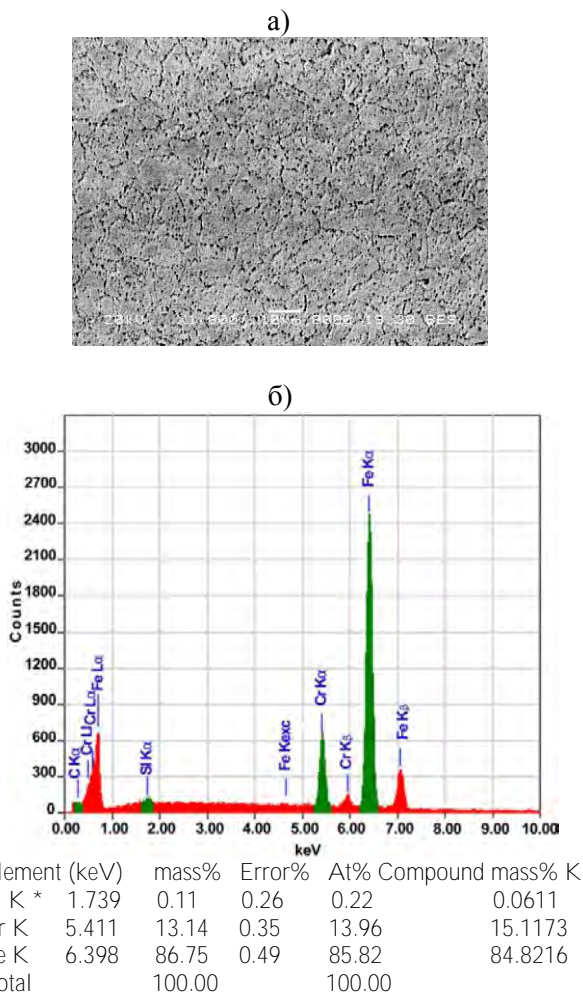


Рис. 3.39. Морфология (а, $\times 1000$) и химический состав (б) поверхности образца из стали 20Х13 после ЭИП в однокомпонентном растворе

В условиях интенсивного выделения газов на поверхности анода энергии взрывов электролитных мостиков, коммутирующих ПГО,

оказывается достаточно для удаления с поверхности карбидов железа и карбидов хрома, которые смываются с поверхности в объем раствора. На месте удаленного карбида остается кратер в виде питтинга. Аналогичный процесс дезинтеграции компонентов сплава наблюдается при ЭИП аустенитных коррозионностойких сталей [231, 236–238, 334] и при ЭХП хромистых сталей [327]. Незначительное (менее 0,1 ат.%) содержание углерода (рис. 3.39, б) и снижение на 0,67 масс.% концентрации хрома на полированной поверхности по сравнению с исходной свидетельствуют в пользу предложенного механизма, а также говорят о возможном обезуглероживании тонкого поверхностного слоя.

На рис. 3.40 представлены морфология и спектрограмма с элементным химическим составом поверхности переходной области на границе раздела «электролит–воздух» после ЭИП образца в однокомпонентном растворе. На рис. 3.40, а видно, что существенных различий в морфологии переходной области по сравнению с морфологией полированной поверхности (рис. 3.39, а) не наблюдается. Особенностью переходной области в этом случае является высокая концентрация кислорода на поверхности (1,0 масс.%) и снижение на 0,33 масс.% количества хрома по сравнению с полированной (рис. 3.39, б) и на 1,0 масс.% по сравнению с исходной (рис. 3.38) поверхностями, что свидетельствует об увеличении толщины кислородсодержащей поверхностной пленки и скорости растворения хрома в ферритной матрице.

При ЭИП вследствие турбулизации потоков электролита и выхода над верхним торцом образца водяного пара и газовой фазы из ПГО структура и толщина ПГО в этой области существенно отличаются от структуры и толщины ПГО, характерных для областей устойчивого протекания процесса ЭИП. В результате, на верхнем торце образца образуется визуально различимая поверхностная пленка бурого цвета (рис. 3.41). На рис. 3.41, а видно, что структура поверхностной пленки неоднородна. На фоне относительно равномерно распределенной на поверхности основной пленки бурого цвета с небольшими темными включениями видны участки пленки, имеющие чешуйчатую структуру. Кроме того, под основной и чешуйчатой пленками проступают светлые участки поверхности. Количественный химический анализ выявил в составе основной пленки в аномально больших количествах кислород (14,54 масс.%), уг-

лерод (4,55 масс.%) и серу (1,05 масс.%) (рис. 42, а). Кроме того, в пленке содержится железо в количестве 71,14 масс.% и хром в количестве 8,37 масс.%.

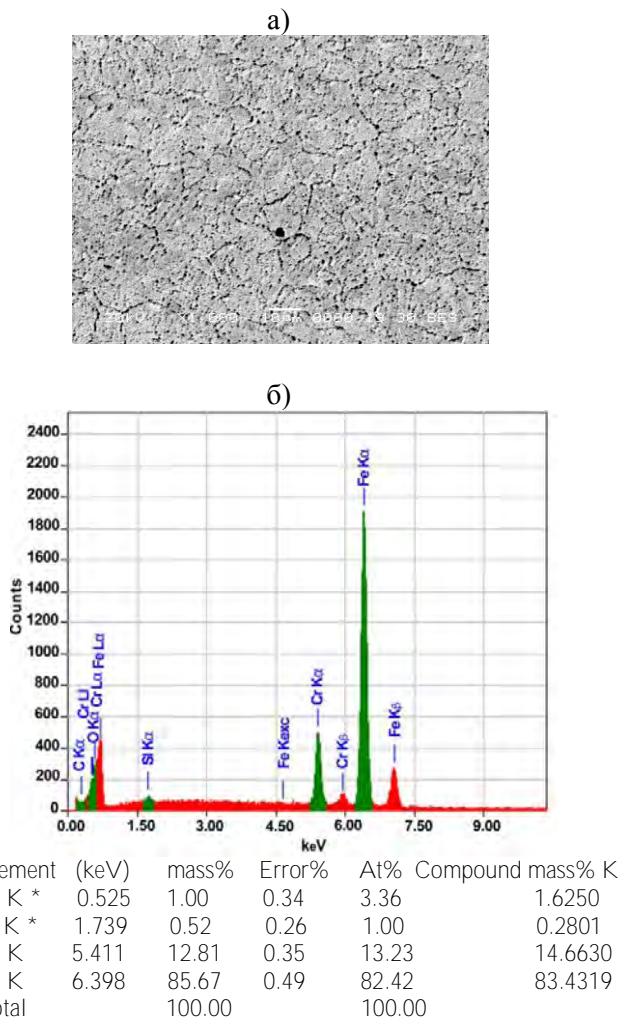


Рис. 3.40. Морфология (а, x1000) и химический состав (б) переходной области после ЭИП в однокомпонентном растворе

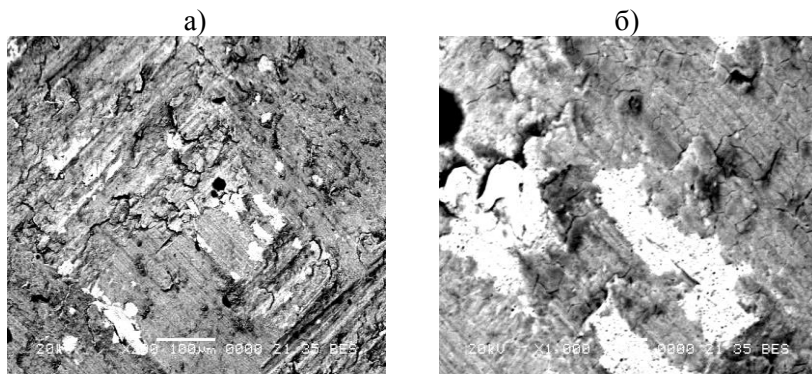


Рис. 3.41. Морфология поверхности верхнего торца образца из стали 20X13 после ЭИП в однокомпонентном растворе:
a – $\times 200$, *б* – $\times 1000$

Следовательно, основная поверхностная пленка предположительно состоит преимущественно из гидроксида трехвалентного железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$ бурого цвета, а также из оксидов и карбидов железа и хрома. В составе светлых участков на поверхности верхнего торца образца содержание кислорода составляет 0,71 масс.%, 13,98 масс.% хрома и менее 0,1 ат.% углерода (рис. 3.42, *б*). Химический состав и небольшое (на 0,17 масс.%) превышение концентрации хрома на светлых участках по сравнению с исходной поверхностью свидетельствует о том, что пленка, покрывающая светлую поверхность, состоит из оксидов хрома и железа, причем толщина этой пленки существенно меньше толщины основной пленки. Содержание карбидов хрома и карбидов железа на светлых участках поверхности незначительно. Отметим, что превышение количества хрома на 0,84 масс.% и снижение количества железа на 1,83 масс.% на светлых участках по сравнению с полированной поверхностью (рис. 3.42, *б*) указывают на селективное растворение феррита на светлых участках поверхности. Появление светлых участков на поверхности при ЭИП коррозионностойких сталей, также как и при ЭИП низколегированных углеродистых сталей, объясняется недостаточной адгезионной прочностью «толстых» основных пленок в условиях интенсивного выделения газов на обрабатываемой поверх-

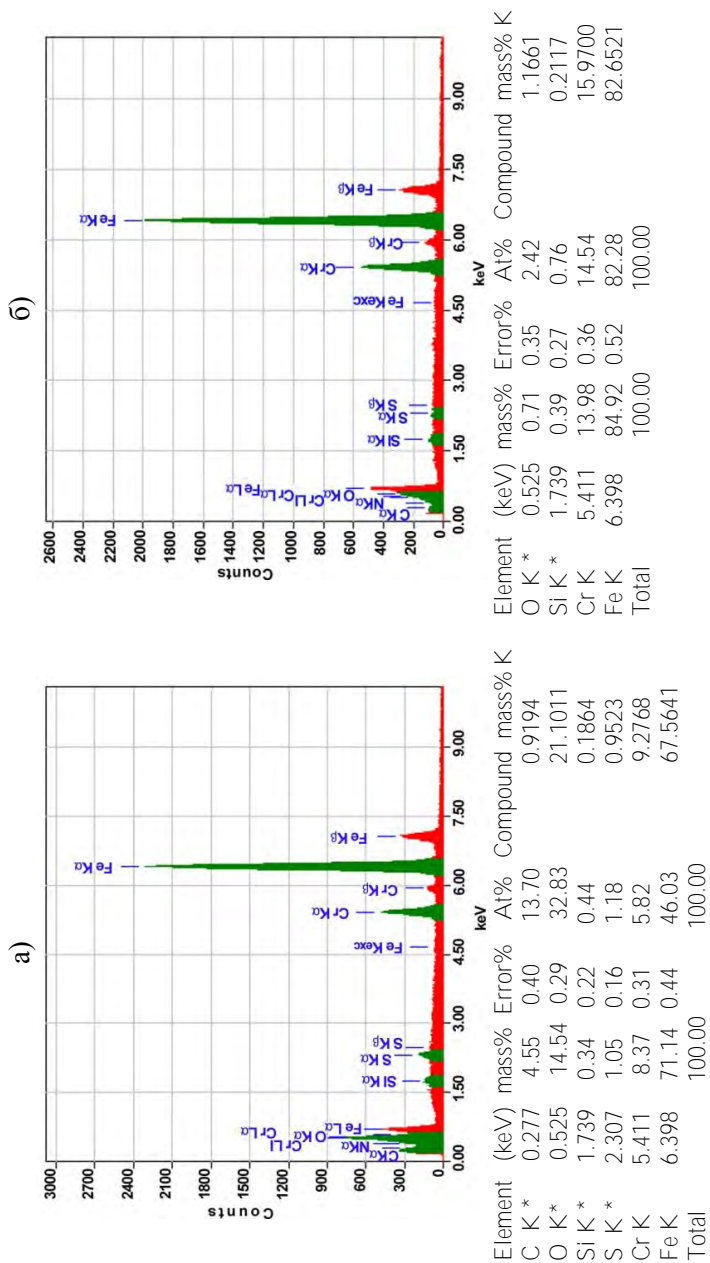


Рис. 3.42. Спектрограмма и химический состав основной пленки (а) и светлых участков (б) на поверхности верхнего торца образца из стали 20Х13 после ЭИП в однокомпонентном растворе

ности и непрерывно протекающих микровзрывов электролитных мостиков, замыкающих ПГО.

На рис. 3.43 представлены морфология и спектрограмма с элементным химическим составом поверхности образца после ЭИП в двухкомпонентном растворе.

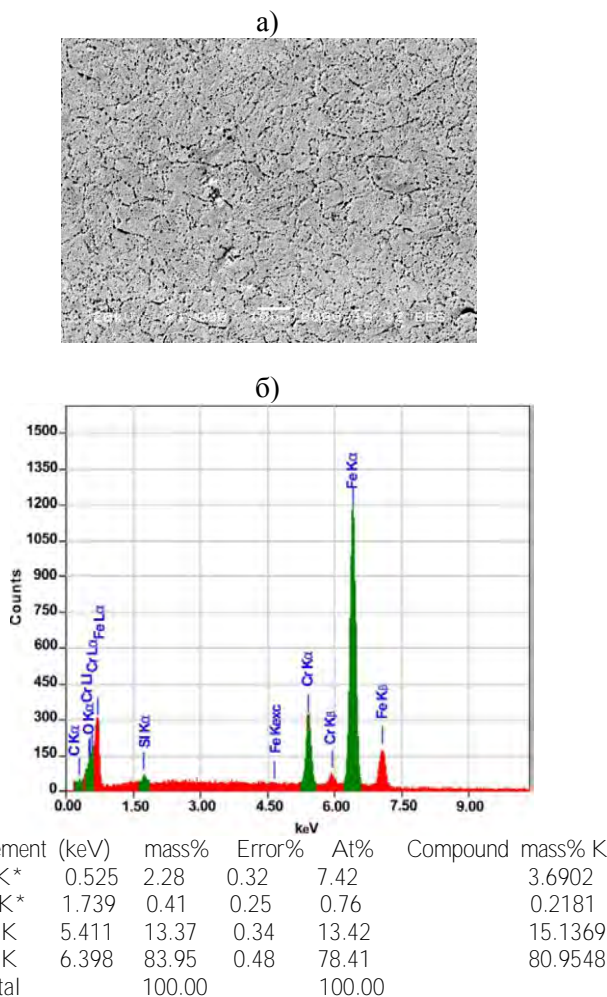


Рис. 3.43. Морфология (а, x1000) и химический состав (б) поверхности образца из стали 20Х13 после ЭИП в двухкомпонентном растворе

Сравнительный анализ морфологии и химического состава поверхностей показал, что растворение коррозионностойкой стали 20Х13 при ЭИП как в однокомпонентном, так и в двухкомпонентном растворах происходит по одному механизму. На фоне достаточно равномерного растворения основных компонентов сплава с пропорциональным переходом ионов железа и хрома в раствор электролита происходит селективное растворение узких участков ферритной матрицы, примыкающих к карбидным частицам, с последующим удалением карбидов в раствор.

Следует отметить, что по сравнению с обработкой в однокомпонентном растворе скорость растворения феррита при обработке в двухкомпонентном растворе выше, о чем свидетельствует снижение количества железа на 2,80 масс.% и повышение на 0,23 масс.% концентрации хрома на поверхности образца (рис. 3.43, б) по сравнению с образцом, обработанным в однокомпонентном растворе (рис. 3.39, б). Кроме того, непропорциональное изменение концентраций железа и хрома и высокое содержание кислорода на поверхности (2,28 масс.%) могут свидетельствовать о более высокой концентрации оксида хрома Cr_2O_3 и более легкой адсорбции молекул воды на поверхности при ЭИП в двухкомпонентном растворе. Приведенные данные хорошо согласуются с данными, полученными методом РФЭС (табл. 3.6).

На рис. 3.44, а представлена морфология поверхности переходной области на границе раздела «электролит–воздух» после ЭИП образца в двухкомпонентном растворе, из которого следует, что в условиях «нестационарной» обработки переходной области происходит более интенсивное селективное растворение ферритной матрицы, примыкающей к карбидным частицам. Размер питтингов на поверхности и на границах кристаллитов увеличился в 2–5 раз, причем питтинги, расположенные на границах зерен, слились в сплошные линии. Низкая концентрация кислорода на поверхности (менее 0,1 ат.%) (рис. 3.44, б) свидетельствует о высокой скорости растворения фазовых и адсорбционно-фазовых поверхностных оксидных и гидроксидных пленок железа. По сравнению с поверхностью образца, полированного в двухкомпонентном растворе, концентрация железа на поверхности переходной области увеличилась на 2,73 масс.%, в то время как количество хрома уменьшилось на 0,32 масс.%. Линия углерода на спектрограмме отсутствует. Следо-

вательно, при проведении процесса ЭИП в двухкомпонентном растворе в «нестационарных» условиях происходит более интенсивное удаление с поверхности карбидов хрома и карбидов железа по сравнению с обработкой в «стационарных» условиях.

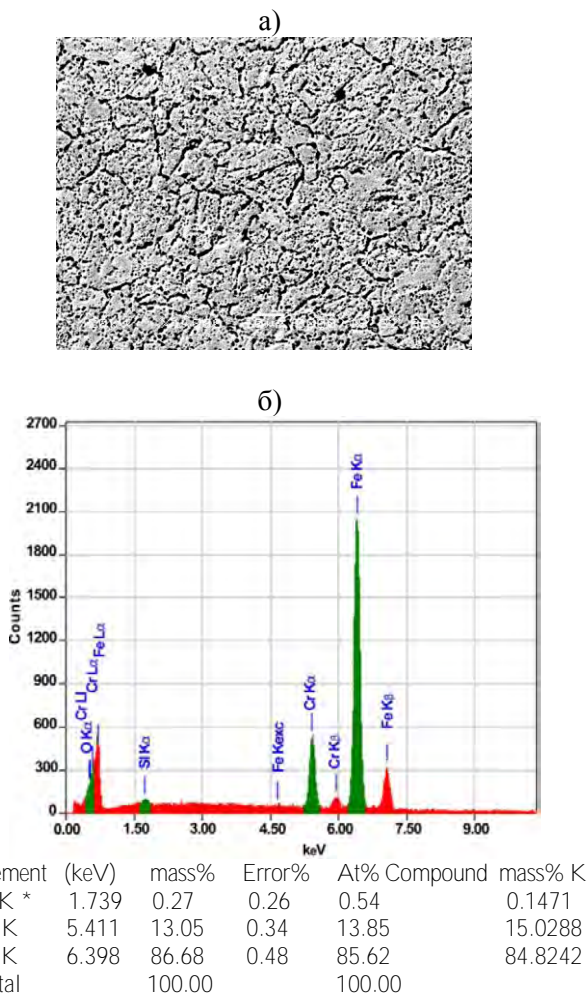


Рис. 3.44. Морфология (а, $\times 1000$) и химический состав (б) переходной области образца из стали 20X13 после ЭИП в двухкомпонентном растворе

Таким образом, при ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей в результате протекающих на обрабатываемой поверхности анодных процессов обеспечивается съём металла с одновременным формированием поверхностных плёнок, которые в зависимости от условий проведения процесса ЭИП могут иметь различную природу и толщину. Полученные экспериментальные данные о содержании хлора и серы в поверхностных плёнках свидетельствуют о том, что анодное растворение низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей происходит с непосредственным участием анионов раствора электролита – хлорид- или сульфат-ионов, причем растворение происходит в результате селективного растворения структурных составляющих сталей.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, ХРОМА И НИКЕЛЯ

4.1. Физико-математическая модель самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите в условиях электроимпульсного полирования

При ЭИП скорость и направление гидродинамических потоков в электролите оказывают значительное влияние на устойчивость, структуру и толщину ПГО [148, 205, 223, 240], которые, в свою очередь, оказывают влияние на качество поверхности, точность и производительность обработки [223, 240, 243, 245, 246, 311, 335–339]. Выявление основных закономерностей и математическое моделирование гидродинамических потоков в электролите будет способствовать установлению механизмов электрической проводимости ПГО и съема металла с обрабатываемой поверхности, позволит расширить область практического применения традиционной технологии ЭИП и разработать новые технологии, в частности, с использованием свободных и затопленных струй и методом прокачки электролита.

4.1.1. Физическая модель самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите

Экспериментальное исследование самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите в условиях ЭИП проводилось по методике, приведенной в разделе 2.3.1. Визуальные наблюдения за движением электролита в процессе обработки и анализ видеосъемки показали, что при ЭИП плоского, цилиндрического и сферического образцов наблюдаются подобные самоорганизованные гидродинамические потоки и завихрения, схема которых представлена на рис. 4.1 [252]. Водяной пар и газы ПГО, перемещаясь вверх вдоль обрабатываемой поверхности, за счет сил трения увлекают за собой электролит в приграничной с ПГО области, организуя восходящий поток 1. Его организации и поддержанию в некоторой степени способствует конвективное движение электролита. Сталкиваясь с зеркалом электролита, восходящий поток отражается от него

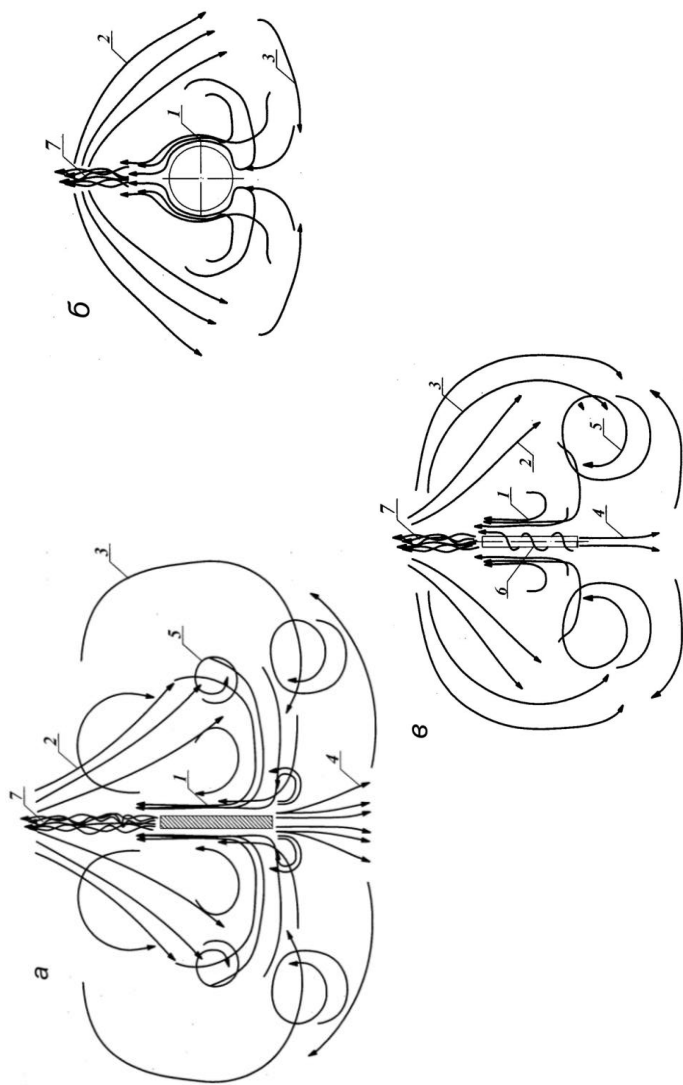


Рис. 4.1. Схема самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите при ЭИП плоского (а), сферического (б) и цилиндрического (в) образцов.

Потоки:

1 – восходящий, 2 – обратный, 3 – круговой, 4 – торцевой, 5 – вихревой, 6 – спиралевидный, 7 – турбулентный

под некоторым углом, образуя обратный поток 2, которому придается ускорение движению вследствие выхода пара и газа в атмосферу и схлопывания пузырьков пара и газа в приповерхностном слое электролита. Часть обратного потока под действием сил трения выделяется в расходящийся круговой поток 3. Пульсация ПГО в области нижнего торца образца и кавитационное схлопывание пузырьков пара и газа способствуют возникновению и ускорению движения торцевого потока 4. При ЭИП сферического образца торцевой поток визуально не наблюдался. Круговой поток 3, постепенно теряя энергию, сталкивается с замедляющимися обратным 2 и торцевым 4 потоками и образует завихрения – вихревой поток 5. Спиралевидный поток 6 возникает только в случае, когда продольная ось цилиндрического образца отклонена от вертикали. Очевидно, что причины возникновения спиралевидного потока 6 аналогичны причинам возникновения восходящего потока 1. Турбулентный поток 7 образуется вследствие интенсивного выхода водяного пара и газов ПГО в атмосферу, скорость движения которых определяют скорость движения турбулентного потока 7. Анализ видеосъемки показал, что основными потоками, оказывающими наибольшее влияние на структуру и динамику ПГО, являются восходящий, обратный и торцевой потоки. Остальные потоки являются результатом слияния или разветвления основных потоков.

4.1.2. Математическое моделирование самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите

Математически описать совокупное движение всех потоков не представляется возможным. Поэтому для анализа общей картины самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите в условиях ЭИП исследуем по отдельности каждый из основных потоков [252]. Изучив закономерности движения основных потоков, можно с большой достоверностью охарактеризовать совокупное движение гидродинамических потоков в электролите.

Различают два режима движения жидкости – ламинарный и турбулентный, которые характеризуются критерием Рейнольдса [310]

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (4.1)$$

где Re – число Рейнольдса; v – средняя в сечении скорость движения потока жидкости, м/с; d – средний диаметр потока жидкости, м; ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

Выполним оценку режима движения основных самоорганизованных гидродинамических потоков при ЭИП плоского, цилиндрического и сферического образцов, приняв кинематическую вязкость $\nu = 0,37 \cdot 10^{-6}$ м²/с при температуре электролита $T_{эл} = 80$ °С [310]. В соответствии с [310] каждый из потоков будем считать совокупностью большого числа элементарных струек. Экспериментальные данные о средних скоростях v и диаметрах d элементарных струек электролита в середине от начала установившегося движения потоков, а также рассчитанные числа Рейнольдса Re приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Числа Рейнольдса, средние диаметры и скорости потоков

Название потока	Форма образца								
	Плоская			Цилиндрическая			Сферическая		
	d , м	v , м/с	Re	d , м	v , м/с	Re	d , м	v , м/с	Re
Восходящий	0,005	0,09	1216	0,005	0,09	1216	0,002	0,09	486
Обратный	0,01	0,06	1622	0,01	0,07	1892	0,01	0,06	1622
Торцевой	0,004	0,06	649	0,005	0,07	946	–	–	–

Как видно из табл. 4.1, полученные числа Рейнольдса не превышают критического значения $Re_{кр} = 2000–2320$ [310]. Следовательно, для всех основных потоков режим их движения ламинарный, который характеризуется устойчивостью течения элементарных струек, отсутствием их перемешивания и обмена частицами между струйками в потоке. Энергия жидкости в этом случае расходуется лишь на преодоление сил трения [310].

На рис. 4.2 представлены расчетные схемы для обратного, торцевого и восходящего потоков, согласно которым обратный поток для плоского, цилиндрического и сферического образцов и торцевой поток для плоского и цилиндрического образцов имеют вид конуса, расширяющегося к низу под углом β . В качестве допущения примем движение этих потоков между сечениями $|–|$ и $||–||$ как движение жидкости в диффузоре.

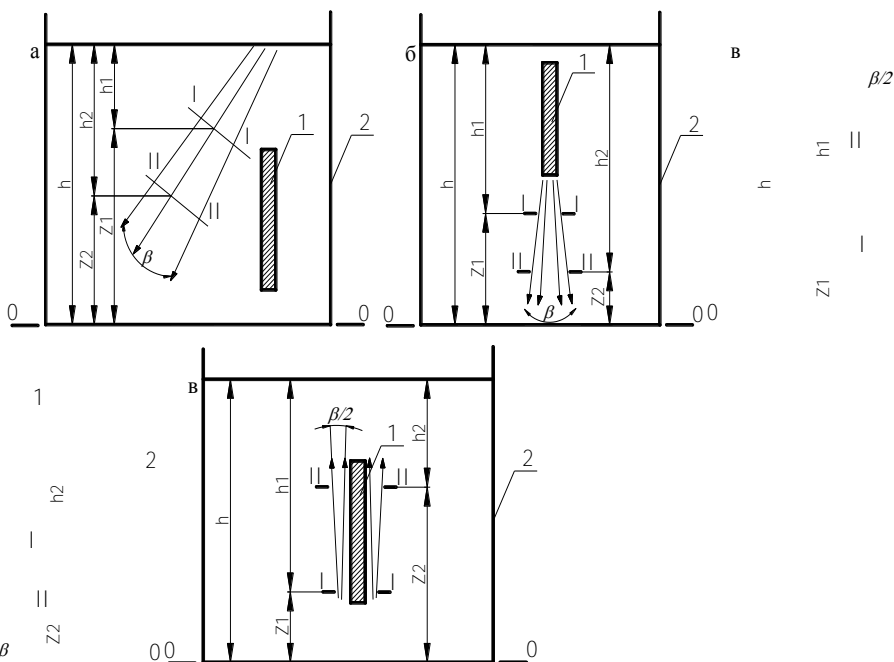


Рис. 4.2. Расчетные схемы для обратного (а), торцевого (б) и восходящего (в) потоков: I-I; II-II – сечение потока; 0-0 – плоскость сравнения; 1 – образец; 2 – электролитическая ячейка

Выполним математическое моделирование обратного и торцевого потоков с учетом принятого допущения. Для анализа движения потоков воспользуемся уравнением Бернулли, которое для потока вязкой (реальной) жидкости имеет вид [310]

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}, \quad (4.2)$$

где z_1 и z_2 – ординаты, определяющие высоту положения центров соответственно сечений I-I и II-II над произвольной плоскостью сравнения 0-0; P_1 и P_2 – гидродинамические давления жидкости в тех же точках; v_1 и v_2 – средние скорости в рассматриваемых жи-

вых сечениях I-I и II-II; γ – удельный вес жидкости; g – ускорение свободного падения; α – коэффициент Кориолиса; $h_{w_{1-2}}$ – потери напора на преодоление сопротивлений от сечения I-I до сечения II-II.

Гидродинамические давления P_1 и P_2 в общем виде определяются выражением [340]

$$P_i = \frac{1}{3}(\sigma_{x_i} + \sigma_{y_i} + \sigma_{z_i}),$$

где σ_{x_i} ; σ_{y_i} ; σ_{z_i} – нормальные напряжения, действующие на три взаимно перпендикулярные элементарные площадки, проведенные через рассматриваемую i -ю точку движущейся жидкости.

Для потока реальной жидкости в качестве гидродинамических давлений P_1 и P_2 примем гидростатические давления в соответствующих сечениях потока, которые можно определить из равенства [310]

$$P_i = P_0 + \gamma \cdot h_i, \quad (4.3)$$

где P_i – гидростатическое давление в i -той точке под свободной поверхностью жидкости; P_0 – внешнее давление над свободной поверхностью жидкости; h_i – глубина погружения i -той точки под свободной поверхностью жидкости.

Потери напора $h_{w_{1-2}}$ между сечениями I-I и II-II равны сумме потерь на трение по длине $h_{дл}$ и местных потерь h_m [340]

$$h_{w_{1-2}} = h_{дл} + h_m, \quad (4.4)$$

где $h_{дл}$ – потери на трение по длине; h_m – местные потери.

Потери напора на трение по длине $h_{дл}$ в общем случае определяются по формуле Дарси–Вейсбаха [310]

$$h_{дл} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (4.5)$$

где λ – гидравлический коэффициент трения; l – длина потока.

Гидравлический коэффициент трения для ламинарных потоков определяется по закону Гагена-Пуазейля [341]

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (4.6)$$

Тогда выражение (4.5) с учетом (4.6) примет вид

$$h_{дл} = \frac{64}{Re} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}. \quad (4.7)$$

Местные потери напора h_m с учетом принятого допущения о движении обратного и торцевого потоков в диффузоре можно представить как потери напора в диффузоре $h_{диф}$ и определить из выражения [342]

$$h_m = h_{диф} = \xi_{диф} \cdot \frac{v_2^2}{2g}, \quad (4.8)$$

где $\xi_{диф}$ – коэффициент сопротивления диффузора.

При расширении потока в диффузоре в пределах угла $\beta = 8-25^\circ$ коэффициент сопротивления диффузора можно определить по формуле [273]

$$\xi_{диф} = \sin \beta \cdot \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2, \quad (4.9)$$

где S_1 ; S_2 – площади живого сечения потока соответственно в сечениях I-I и II-II; β – угол расширения потока.

Одним из условий применимости уравнения Бернулли является его использование совместно с уравнением неразрывности потока вида [310]

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad \text{или} \quad \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{v_2}{v_1}, \quad (4.10)$$

где d_1 и d_2 – диаметры потока соответственно в сечениях I-I и II-II.

Тогда местные потери напора (4.8) с учетом (4.9) и (4.10) можно определить из выражения

$$h_M = \frac{v_2^2}{2g} \cdot \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \sin \beta. \quad (4.11)$$

Подставив (4.7) и (4.11) в (4.4), получим выражение для определения потерь напора между сечениями I-I и II-II

$$h_{w_{1-2}} = \frac{v^2 \cdot 64 \cdot l}{2g \cdot Re \cdot d} + \frac{v_2^2}{2g} \cdot \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \sin \beta. \quad (4.12)$$

После подстановки (4.3) и (4.12) в (4.2) уравнение Бернулли примет вид

$$z_1 + h_1 + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2g} + \frac{v^2 \cdot 64 \cdot l}{2g \cdot Re \cdot d} + \frac{v_2^2}{2g} \cdot \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \sin \beta. \quad (4.13)$$

Для ламинарных потоков коэффициент Кориолиса α можно принять равным 1 [310]. Среднюю скорость потока v можно выразить из (4.1) через число Рейнольдса Re , кинематическую вязкость жидкости ν и средний диаметр потока d . В соответствии с расчетными схемами (рис. 4.2) глубину погружения центров сечений потока I-I и II-II можно определить из выражений

$$h_1 = h - z_1; \quad h_2 = h - z_2. \quad (4.14)$$

Тогда после преобразования (4.13) с учетом (4.1), (4.10) и (4.14) получим выражение для определения средней скорости потока в сечении I-I

$$v_1^2 = \frac{64 \cdot Re \cdot v^2 \cdot l}{d^3} + v_2^2 \left[1 + \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 \cdot \sin \beta\right]. \quad (4.15)$$

Из (4.15) длину потока l до его затухания в точке, в которой $v_2 \rightarrow 0$, а поток меняет направление (рис. 4.1), можно выразить в виде

$$l = \frac{v_1^2 \cdot d^3}{64 \cdot Re \cdot v^2}. \quad (4.16)$$

В соответствии с расчетными схемами, представленными на рис. 4.2, *а*; *б*, средний диаметр потока d можно выразить через диаметры потока d_1 и d_2 в сечениях $|-|$ и $||-||$

$$d = d_1 + l \cdot \operatorname{tg}(\beta/2) \quad \text{или} \quad d = d_2 - l \cdot \operatorname{tg}(\beta/2). \quad (4.17)$$

Тогда равенство (4.15) с учетом (4.17) примет вид

$$v_1^2 = \frac{64 \cdot Re \cdot v^2 \cdot l}{(d_1 + l \cdot \operatorname{tg}(\beta/2))^3} + v_2^2 \cdot \left[1 + \left(1 - \frac{d_1^2}{(d_1 + 2 \cdot l \cdot \operatorname{tg}(\beta/2))^2} \right)^2 \cdot \sin \beta \right]. \quad (4.18)$$

Введем обозначение

$$A = 1 + \left(1 - \frac{d_1^2}{(d_1 + 2 \cdot l \cdot \operatorname{tg}(\beta/2))^2} \right)^2 \cdot \sin \beta. \quad (4.19)$$

Выразив v_2 из (4.10) через v_1 , d_1 и d_2 и подставив в (4.18) с учетом (4.19), после преобразования получим выражение для расчета начальной скорости обратного и торцевого потоков

$$v_1 = \sqrt{\frac{64 \cdot Re \cdot v^2 \cdot l}{(d_1 + l \cdot \operatorname{tg}(\beta/2))^3 \cdot \left(1 - \frac{A \cdot d_1^4}{(d_1 + 2 \cdot l \cdot \operatorname{tg}(\beta/2))^4} \right)}}. \quad (4.20)$$

Выполним математическое моделирование восходящего потока, приняв допущение о том, что плоский образец расположен в потоке при плоскопараллельном, а цилиндрический и сферический образцы – при пространственном обтекании потоком (рис. 4.2, *в*). Так же,

как и при анализе обратного и торцевого потоков, для анализа восходящего потока воспользуемся уравнением Бернулли (4.2). В этом случае потери напора h_{w1-2} между сечениями $|-|$ и $||-||$ определим по формуле (4.4), а потери напора на трение по длине $h_{дл}$ – по (4.7). При этом под средним диаметром потока d будем понимать средний диаметр восходящего потока D , обтекающего образец. Выразив из (4.1) среднюю в сечении скорость движения потока жидкости v через Re , v и d и подставив в (4.7), после преобразования получим

$$h_{дл} = \frac{64 \cdot Re \cdot v^2 \cdot l}{2g \cdot D^3}, \quad (4.21)$$

где D – средний диаметр восходящего потока.

Согласно [341], местные потери напора h_m , обусловленные расположением тела (образца) в потоке, равны сопротивлению тела. В общем случае местные потери напора с учетом расчетной схемы (рис. 4.2, в) определяются по формуле Вейсбаха [310]

$$h_m = \xi \cdot \frac{v_2^2}{2g}, \quad (4.22)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления; v_2 – средняя скорость потока в сечении за местным сопротивлением.

В случае соосного расположения тела в потоке коэффициент местного сопротивления ξ определяется по формуле [341]

$$\xi = 1,15 \cdot C_x \cdot \frac{S_m/F_0}{(1 - \tau \cdot S_m/F_0)^3},$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления тела; S_m – миделева площадь тела в потоке; F_0 – площадь сечения потока; τ – коэффициент, учитывающий влияние формы тела и стеснение поперечного потока.

Подставив (4.3), (4.21) и (4.22) в уравнение Бернулли (4.2), приняв $\alpha=1$ и преобразовав (4.2) с учетом (4.14), получим выражение для определения средней скорости потока в сечении $|-|$

$$v_1^2 = \frac{64 \cdot Re \cdot v^2 \cdot l}{D^3} + v_2^2 \cdot (1 + \xi). \quad (4.23)$$

Вследствие потерь напора по длине и под воздействием газовой фазы ПГО восходящий поток принимает вид конуса, расширяющегося кверху под углом β (рис. 4.2, в). При $\beta < 5^\circ$ местными потерями напора из-за расширения потока можно пренебречь ввиду их малой величины. Тогда, выразив v_1 из (4.17) через v_2 и приняв $d_2 = D$, из уравнения неразрывности потока (4.10) выразим v_2 через v_1

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{\left(D - 2 \cdot l \cdot \operatorname{tg}\left(\beta/2\right)\right)^2}{D^2}. \quad (4.24)$$

Введем обозначение

$$B = \frac{\left(D - 2 \cdot l \cdot \operatorname{tg}\left(\beta/2\right)\right)^2}{D^2}. \quad (4.25)$$

Подставив (4.24) в (4.23) и преобразовав его с учетом (4.25), получим выражение для расчета начальной скорости восходящего потока

$$v_1 = \sqrt{\frac{64 \cdot Re \cdot v^2 \cdot l}{D^3 (1 - B^2 \cdot (1 + \xi))}}. \quad (4.26)$$

При расположении образца в электролите на достаточно большой глубине восходящий поток затухает, не достигнув поверхности электролита. Тогда длину потока l до его затухания, когда $v_2 \rightarrow 0$, получим из равенства (4.23)

$$l = \frac{v_1^2 \cdot D^3}{64 \cdot Re \cdot v^2}. \quad (4.27)$$

Для оценки адекватности предложенных математических моделей самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите выполним расчет длины основных потоков до их затухания при ЭИП плоского и цилиндрического образцов. Для расчета длины обратного и торцевого потоков используем выражение (4.16), восхо-

дыщего потока – (4.27). В (4.27) критерий Рейнольдса Re заменим выражением (4.1). При выполнении расчетов кинематическая вязкость электролита принята $\nu=0,37 \cdot 10^{-6}$ м²/с при $T_{эл}=80$ °С [310] и использованы экспериментальные данные, приведенные в табл. 4.1. Средний диаметр восходящего потока D определим из выражения

$$D = d_0 + 2 \cdot d,$$

где d_0 – диаметр образца, м.

Для плоского образца в качестве диаметра образца d_0 принят диаметр, рассчитанный из миделевой площади образца. На рис. 4.3 представлены графики зависимостей расчетной длины l основных самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите от их начальной скорости v_1 . Рассчитанные значения хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными на основании анализа видеосъемки движения электролита в процессе ЭИП.

Таким образом, в условиях ЭИП динамика ПГО является определяющим фактором возникновения и организации движения гидродинамических потоков в электролите, причем независимо от формы образца в электролите наблюдаются подобные потоки, к основным из которых относятся восходящий, обратный и торцевой. Полученные математические модели указывают на корреляцию между длиной и скоростью потоков с физико-механическими свойствами электролита, конфигурацией и размерами обрабатываемой заготовки. Анализ показывает, что при ЭИП самоорганизованные гидродинамические потоки в электролите снимают диффузионные ограничения в электролите по массопереносу электроактивного вещества в зону реакции, но недостаточны для перемешивания электролита при обработке относительно небольших по размерам заготовок, что неизбежно приводит к градиенту температуры электролита по высоте ванны, для устранения которого необходимо принудительное перемешивание электролита, например, затопленными струями или путем барботажа электролита сжатым воздухом [164, 223, 232, 249, 311, 336, 343–346].

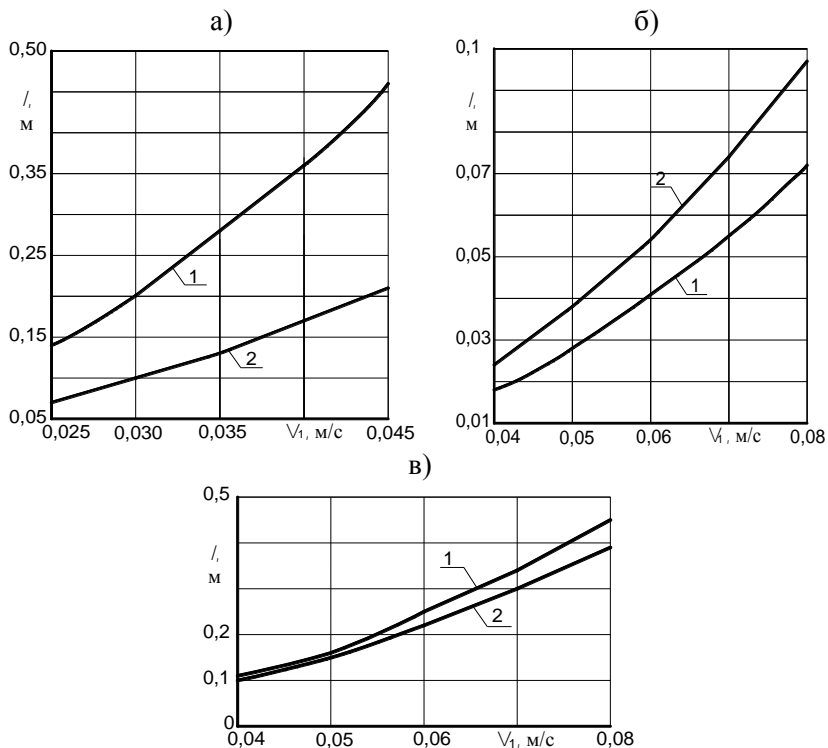


Рис. 4.3. Зависимость длины восходящего (а), торцевого (б) и обратного (в) потоков от начальной скорости потоков и формы образца.

Форма образца:

1 – плоская; 2 – цилиндрическая

4.2. Физико-математическая модель парогазовой оболочки

Динамическую систему «поверхность анода–ПГО–электролит» представим в виде квазистационарной плоскопараллельной модели – аналога плоского конденсатора (рис. 4.4) [258], для которой справедливо неравенство

$$R_0 \gg l_0,$$

где R_0 – радиус кривизны поверхности анода; l_0 – толщина ПГО.

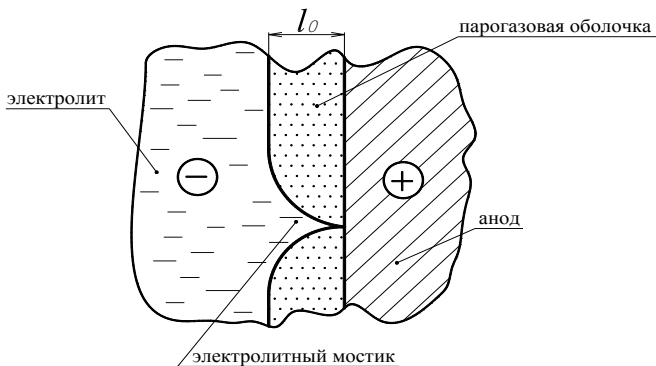


Рис. 4.4. Квазистационарная плоскопараллельная модель ПГО

Квазистационарность модели на продолжительном временном интервале обусловлена взаимной компенсацией сил, действующих в динамической системе «поверхность анода–ПГО–электролит». В случайные моменты времени в результате флуктуаций электролита в приграничной с ПГО области и газовой фазы в ПГО равновесное состояние системы может нарушаться. В областях неоднородностей электрического поля электролит под действием пондеромоторных сил втягивается в ПГО, образуя микроскопические электролитные мостики, которые в конечном итоге замыкают ПГО. Величина пондеромоторной силы определяется напряженностью электрического поля. Без учета направления пондеромоторной силы ее можно представить в виде

$$F = \frac{\partial W}{\partial l_0}, \quad (4.28)$$

где F – пондеромоторная сила; W – энергия электрического поля в ПГО.

В свою очередь, энергию электрического поля можно определить как

$$W = w \cdot V = w \cdot S \cdot l_0 = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot S \cdot l_0}{2} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2 \cdot S}{2l_0}, \quad (4.29)$$

где w – плотность энергии электрического поля в ПГО; V – объем ПГО; S – площадь поверхности анода; ε – относительная диэлектриче-

ская проницаемость среды; ε_0 – электрическая постоянная; E – напряженность электрического поля; U – падение напряжения на ПГО.

Подставив в (4.28) выражение для W из (4.29) и взяв частную производную по l_0 , получим

$$F = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2 \cdot S}{2l_0^2}. \quad (4.30)$$

Эта сила вызывает дополнительное давление электролита на ПГО, которое можно определить как

$$\Delta P = \frac{F}{S} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2}{2l_0^2}, \quad (4.31)$$

где ΔP – дополнительное давление электролита на ПГО под действием пондеромоторной силы.

Движение единичного электролитного мостика в ПГО можно описать уравнением Бернулли (4.2). Допустив, что движение мостика происходит в ламинарном режиме, коэффициент Кориолиса α примем равным 1 [310]. Скорость движения мостика в момент его зарождения $v_1 = 0$. С учетом пренебрежимо малой толщины ПГО потерей напора h_{w1-2} на преодоление сопротивлений при движении электролитного мостика в ПГО можно пренебречь. Удельный вес электролита связан с его плотностью выражением

$$\gamma = \rho \cdot g,$$

где γ – удельный вес электролита; ρ – плотность электролита; g – ускорение свободного падения.

Тогда после преобразования уравнения Бернулли (4.2) получим выражение для определения дополнительного давления электролита на ПГО

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (4.32)$$

где v – скорость движения электролитного мостика в момент его касания с поверхностью анода.

Время, за которое электролитный мостик достигнет поверхности анода, можно определить из выражения

$$\tau \approx \frac{l_0}{v}, \quad (4.33)$$

где τ – время движения электролитного мостика в ПГО.

С другой стороны, это время можно принять равным половине периода высокочастотных колебаний электрического тока в ПГО

$$\tau = T/2, \quad (4.34)$$

где T – период колебаний электрического тока, протекающего через ПГО.

Тогда с учетом (4.33) и (4.34) толщину ПГО можно определить из равенства

$$l_0 = \frac{T \cdot v}{2}, \quad (4.35)$$

Преобразовав (4.35) с учетом (4.31) и (4.32), получим выражение для определения толщины ПГО

$$l_0 = \sqrt{\frac{T \cdot U}{2} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\rho}}} = \sqrt{\frac{U}{2f} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\rho}}}, \quad (4.36)$$

где f – частота колебаний электрического тока в ПГО.

В разделе 1.3.1 показано, что при ЭИП на толщину ПГО оказывает влияние кривизна обрабатываемой поверхности. Оценим это влияние при ЭИП поверхности сложного профиля, включающей плоский и криволинейный участки.

Давление электролита на ПГО над плоским участком поверхности анода можно определить из равенства

$$P_1 = P_0 + P_c + \Delta P, \quad (4.37)$$

где P_1 – давление электролита на ПГО над плоским участком поверхности анода; P_0 – внешнее давление над свободной поверхностью электролита; P_c – давление выше лежащего слоя электролита.

Давление электролита на ПГО в области кривизны поверхности анода можно определить из выражения

$$P_2 = P_0 + P_c + \Delta P' + P_r, \quad (4.38)$$

где P_2 – давление электролита на ПГО в области кривизны поверхности анода; $\Delta P'$ – дополнительное давление электролита на ПГО в области кривизны поверхности анода под действием пондеромоторной силы; P_r – дополнительное капиллярное давление электролита на ПГО в области кривизны поверхности электролита.

По аналогии с (4.31) дополнительное давление в области кривизны поверхности анода $\Delta P'$ запишем в виде

$$\Delta P' = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2}{2l_1^2}, \quad (4.39)$$

где l_1 – толщина ПГО в области кривизны поверхности анода.

Дополнительное капиллярное давление P_r в области кривизны поверхности электролита в соответствии с законом Лапласа определяется по формуле

$$P_r = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (4.40)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения раствора электролита; R_1 ; R_2 – главные радиусы кривизны поверхности электролита на границе с ПГО.

Для случая ЭИП поверхности сложного профиля, включающей плоский и криволинейный участки, будет справедливо равенство

$$P_1 = P_2. \quad (4.41)$$

Перепишем равенство (4.41) с учетом (4.31), (4.37)–(4.40) в виде

$$\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2}{2l_0^2} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2}{2l_1^2} + \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (4.42)$$

После преобразования (4.42), получим выражение для определения толщины ПГО в области кривизны обрабатываемой поверхности

$$l_1 = \frac{l_0}{\sqrt{1 - \frac{2l_0^2 \cdot \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2}}}. \quad (4.43)$$

Рассмотрим частные случаи обработки некоторых криволинейных поверхностей.

При ЭИП цилиндрической поверхности, прямолинейной кромки или паза над обрабатываемой поверхностью формируется ПГО в виде цилиндра или сегмента цилиндра, для которых главные радиусы кривизны поверхности электролита на границе с ПГО $R_1 = R$ и $R_2 = \infty$. В случае обработки наружной цилиндрической поверхности или прямолинейной острой кромки главный радиус кривизны отрицательный ($R < 0$). Тогда (4.43) после преобразования запишем в виде

$$l_1 = \frac{l_0}{\sqrt{1 + \frac{2l_0^2 \cdot \sigma}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2 \cdot R}}}. \quad (4.44)$$

В случае ЭИП внутренней цилиндрической поверхности или прямолинейного паза главный радиус кривизны поверхности электролита положительный ($R > 0$) и выражение (4.43) после преобразования примет вид

$$l_1 = \frac{l_0}{\sqrt{1 - \frac{2l_0^2 \cdot \sigma}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2 \cdot R}}}. \quad (4.45)$$

При ЭИП наружной сферической поверхности или конической поверхности с некоторым радиусом закругления вершины конуса над сферической поверхностью и над вершиной конуса формирует-

ся сферическая ПГО с отрицательными главными радиусами кривизны ($R_1 = R_2 = R < 0$). В этом случае толщина ПГО в области кривизны обрабатываемой поверхности определяется по формуле

$$l_1 = \frac{l_0}{\sqrt{1 + \frac{4l_0^2 \sigma}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2 \cdot R}}}. \quad (4.46)$$

При обработке внутренней сферической поверхности над ней формируется сферическая ПГО с положительными главными радиусами кривизны ($R_1 = R_2 = R > 0$). Тогда выражение (4.43) после преобразования примет вид

$$l_1 = \frac{l_0}{\sqrt{1 - \frac{4l_0^2 \sigma}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2 \cdot R}}}. \quad (4.47)$$

Анализ формул (4.44)–(4.47) показывает, что при ЭИП выпуклых криволинейных поверхностей толщина ПГО над криволинейной поверхностью будет меньше по сравнению с толщиной оболочки над плоской поверхностью ($l_1 < l_0$). Это приводит к повышению напряженности электрического поля в ПГО в области кривизны обрабатываемой поверхности и интенсификации физико-химических процессов, протекающих на поверхности анода и в ПГО, что, в свою очередь, вызывает увеличение съема металла на выпуклых криволинейных поверхностях. Этот эффект экспериментально подтвержден в работе [311]. Согласно приведенным в работе данным, при уменьшении диаметра цилиндрического образца с 1,6 до 0,6 мм скорость съема металла возросла на 58,3 %.

При ЭИП вогнутых криволинейных поверхностей толщина ПГО над криволинейной поверхностью будет больше по сравнению с толщиной оболочки над плоской поверхностью ($l_1 > l_0$). Следовательно, напряженность электрического поля в ПГО в области кривизны обрабатываемой поверхности снижается, равно как и съем металла.

Оценим толщину ПГО, используя выражение (4.36) и приняв $\varepsilon = 1$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\rho = 0,97 \cdot 10^3$ кг/м³ при $T_{эл} = 80$ °С [347].

Оценку выполним для мегагерцового диапазона частот колебаний электрического тока, зафиксированного в экспериментах [90, 222, 253]. На рис. 4.5 представлены теоретические зависимости толщины ПГО над плоским участком поверхности анода от напряжения обработки и частоты колебаний электрического тока в ПГО.

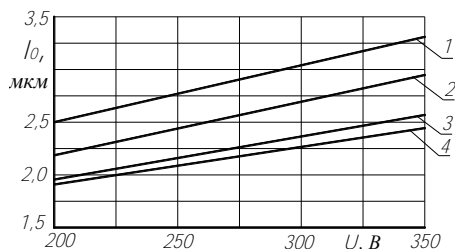


Рис. 4.5. Толщина ПГО в зависимости от напряжения обработки и частоты колебаний электрического тока.
Частота колебаний электрического тока, МГц:
1—1,5; 2—2,0; 3—2,5; 4—3,0

Отметим, что выражения (4.36), (4.43)–(4.47) указывают на корреляцию толщины ПГО с физико-механическими свойствами раствора электролита и параметрами электрического тока в ПГО, в частности, с частотой его колебаний. В разделе 1.2.2 показано, что экспериментальные данные о толщине ПГО находятся в широком диапазоне значений. Используя экспериментальные данные о толщине ПГО, приведенные в работах [106, 112, 122, 152, 221, 223, 239], оценим возможную частоту колебаний электрического тока f , проходящего через ПГО, для чего выражение (4.36) перепишем в виде

$$f = \frac{U}{2l_0^2} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\rho}}$$

На рис. 4.6 в виде графиков представлены теоретические зависимости частоты колебаний электрического тока от экспериментально установленной толщины ПГО, которые указывают на наличие в структуре электрического тока, протекающего в ПГО, низкочастотных колебаний в диапазоне от 0,015 до 0,743 кГц, что хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в раз-

деле 3.1.3.2 и работах [207, 312], и свидетельствует в пользу адекватности предложенной физико-математической модели ПГО.

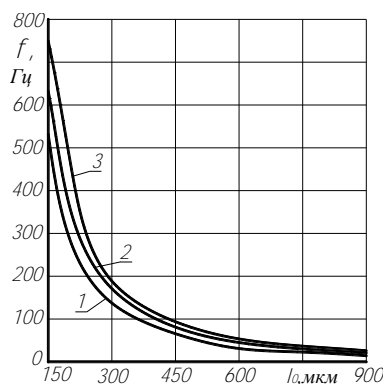


Рис. 4.6. Частота колебаний электрического тока в ПГО в зависимости от толщины ПГО и напряжения обработки.

Напряжение обработки, В:

1 – 250; 2 – 300; 3 – 350

4.2.1. Оценка адекватности математической модели парогазовой оболочки

Оценка адекватности разработанной математической модели ПГО, представленной в разделе 4.2, выполнялась путем экспериментального определения толщины ПГО по методике, приведенной в разделе 2.3.3 [259, 260], теоретической оценки толщины ПГО и среднеквадратического значения силы электрического тока в ПГО с использованием экспериментальных данных о спектральных характеристиках тока, приведенных в разделе 3.1.3.2, и последующего сопоставления полученных результатов с нашими экспериментальными данными и данными других исследователей.

Величина воздушного разрядного промежутка, измеренная с помощью устройства, схема которого представлена на рис. 2.4 [261], находилась в диапазоне от 6 до 57 мкм. Полученные экспериментальные данные с учетом принятого допущения о подобии единичного электрического пробоя воздушного разрядного промежутка замыканию ПГО единичным электролитным мостиком хорошо со-

гласуются с расчетными значениями, представленными на рис. 4.5 и в работе [348], а также с экспериментальными данными о толщине ПГО, приведенными в разделе 1.2.2. Следует отметить, что при температуре электролита свыше 30 °С измерения давали большой разброс значений величины разрядного промежутка вследствие температурных флуктуаций электролита в измерительной ячейке.

Численная оценка толщины ПГО для экспериментально установленной нами низкочастотной области колебаний электрического тока выполнялась по формуле (4.36) при $\epsilon=1$, $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\rho=0,97 \cdot 10^3$ кг/м³ при $T_{эл}=80$ °С [347]. На рис. 4.7 в виде графиков представлены расчетные значения толщины ПГО, показывающие зависимость толщины ПГО от частоты колебаний электрического тока в полосе частот от 0,05 до 1,2 кГц и напряжения обработки в диапазоне от 250 до 350 В [349].

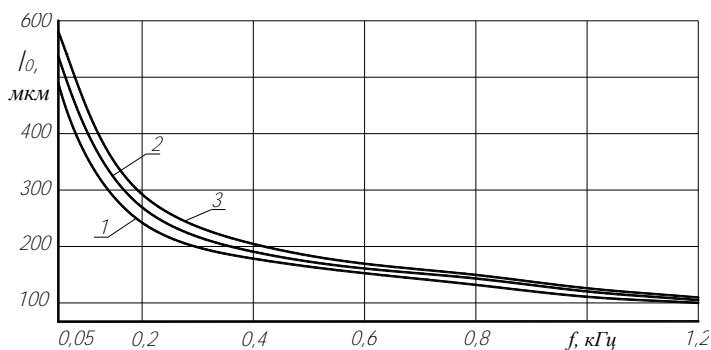


Рис. 4.7. Толщина ПГО в зависимости от частоты колебаний электрического тока в ПГО и напряжения обработки.

Напряжение обработки, В:
1–250; 2–300; 3–350

Из представленных на рис. 4.7 данных следует, что для указанных диапазонов частоты колебаний электрического тока и напряжения обработки толщина ПГО может принимать значения от 100 до 578 мкм, что хорошо согласуется с экспериментальными данными ряда исследователей, приведенными в разделе 1.2.2.

Ранее было показано, что физические процессы, протекающие в ПГО при ЭИП, имеют случайный характер. При этом сигнал элек-

трического тока, зафиксированный в виде осциллограммы на определенном промежутке времени, представляет собой одну из возможных реализаций этого случайного процесса. В радиотехнике большинство случайных процессов являются эргодическими в том смысле, что при нахождении их моментных функций усреднение по статистическому ансамблю реализаций заменяют усреднением по времени, причем длительность интервала времени может быть сколь угодно большой [313–315]. По аналогии будем считать эргодическими случайные физические процессы, протекающие в ПГО в условиях ЭИП. В этом случае каждую из полученных осциллограмм электрического тока можно считать квазипериодической реализацией случайного процесса. Согласно [313–315], любой сколь угодно сложный периодический сигнал может быть разложен на более простые сигналы. В радиотехнике широко используется разложение сигнала $f(t)$ на совокупность гармонических сигналов различных частот в виде ряда Фурье [313]

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] ,$$

где ω – основная угловая частота сигнала $f(t)$; a_0 – амплитуда 0-й гармоники сигнала $f(t)$; $a_0/2$ – постоянная составляющая сигнала $f(t)$; a_n и b_n – амплитуды косинусных и синусных членов ряда Фурье; n – номер гармоники сигнала.

Известно [315], что полная средняя мощность периодического сигнала равна сумме средних мощностей, выделяемых по отдельности постоянной составляющей сигнала и каждой из гармоник. При этом среднеквадратичное (действующее) значение периодической функции электрического тока $I(t)$ можно определить из равенства [350]

$$I_q = \sqrt{\left(\frac{I_0}{2}\right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}} , \quad (4.48)$$

где I_q – среднеквадратичное значение силы тока $I(t)$, А; I_0 ; I_n – амплитуды соответственно 0-ой и n -ой гармоники тока $I(t)$, А; $I_0/2$ – постоянная составляющая тока $I(t)$, А.

Численная оценка среднеквадратичного значения силы электрического тока, протекающего через ПГО в условиях ЭИП, производилась по (4.48) с использованием спектра тока, представленного на рис. 3.17. На спектре выполнили дискретизацию диапазона частот от 0,01 до 1,2 кГц с шагом 0,01 кГц, после чего были измерены ординаты гармоник и рассчитаны амплитуды гармоник тока с учетом сопротивления шунта. Учитывая, что в анализируемом спектре, полученном с помощью анализатора спектра СК4-56, отсутствует информация об амплитуде нулевой гармоники тока, т.е. о величине постоянной составляющей ряда Фурье, а уровень спектра шума зависит от условий проведения процесса обработки, за амплитуду нулевой гармоники тока приняли среднее значение уровня спектра шума равное 0,098 А, измеренное на спектре. Произведенный по (4.48) расчет дал среднеквадратичное значение силы электрического тока равное 6,763 А [349], что соответствует плотности электрического тока 0,414 А/см² и хорошо согласуется с экспериментальными данными, представленными на рис. 3.11. Расхождение экспериментальных данных по плотности тока с рассчитанным значением составляет 3,5 %.

Таким образом, несмотря на случайный характер физических процессов, протекающих в ПГО, случайный сигнал электрического тока в ПГО как на коротких, так и на относительно продолжительных интервалах времени можно считать сложным периодическим сигналом, а случайные физические процессы, протекающие в ПГО – квазидетерминированными случайными процессами. Хорошее согласие расчетных значений толщины ПГО и силы электрического тока с экспериментально полученными данными указывает на достаточную адекватность разработанной математической модели ПГО реальному процессу ЭИП.

4.3. Концептуальная модель коммутационного механизма электрической проводимости парогазовой оболочки в условиях электроимпульсного полирования

Прежде, чем приступить к описанию механизма электрической проводимости ПГО в условиях ЭИП, оценим напряженность электрического поля в ПГО из выражения

$$E = \frac{U}{l_0},$$

где E – напряженность электрического поля в ПГО, В/м; U – падение напряжения на ПГО, В; l_0 – толщина ПГО, м.

Численная оценка, выполненная для толщины обложки в диапазоне от 2,4 до 535 мкм (рис. 4.5 и 4.7) при $U=300$ В, дает величину напряженности электрического поля в ПГО равную $1,25 \cdot 10^3 - 5,6 \cdot 10^5$ В/м.

Здесь важно отметить, что, согласно данным, приведенным в работе [351], инертность жидкости в миниатюрных областях при напряженности электрического поля свыше 10^5 В/м не служит препятствием для развития сверхбыстрых гидродинамических процессов. Учитывая данный факт и приведенные выше результаты теоретических и экспериментальных исследований, можно предложить следующую концептуальную модель механизма электрической проводимости ПГО в условиях ЭИП [257]. На рис.4.8 представлена схема пробоя ПГО единичным электролитным мостиком.

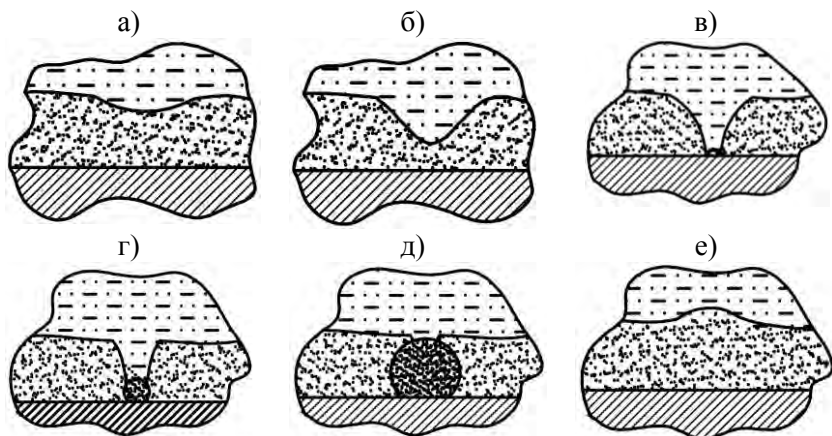


Рис. 4.8. Схема пробоя ПГО электролитным мостиком

Пробой ПГО электролитным мостиком проходит через несколько стадий. На первой стадии (рис. 4.8, а) в области случайной неоднородности электрического поля, вызванной флуктуациями в растворе электролита и в газовой фазе ПГО, на поверхности электро-

лита, граничащей с ПГО, под действием пондеромоторной силы формируется микровыступ и электролит начинает втягиваться в ПГО. Происходит зарождение электролитного мостика (рис. 4.8, б). Назовем этот мостик основным электролитным мостиком. По мере приближения мостика к поверхности анода возрастает локальная напряженность электрического поля и, соответственно, увеличивается пондеромоторная сила, что придает ускорение движению электролитного мостика. При подходе мостика к поверхности анода на расстояние около 1,8–3,3 мкм (рис. 4.5) на поверхности основного мостика зарождаются дополнительные электролитные мостики (рис. 4.8, в) по аналогии с первой стадией пробоя ПГО основным мостиком. Поверхность основного электролитного мостика как бы прорастает множеством дополнительных мостиков. При этом размеры дополнительных электролитных мостиков существенно меньше размера основного мостика.

Физическое состояние основного и дополнительных электролитных мостиков определяется их инерцией и напряженностью электрического поля. Дополнительные мостики достигают поверхности анода за время около 0,2–0,3 мкс и первыми касаются поверхности анода, электрически замыкая ПГО. Основные электролитные мостики по сравнению с дополнительными мостиками обладают большей инерцией. Для достижения поверхности анода им требуется время около 0,5–50,0 мс. По мере джоулевого нагрева токами ионной проводимости температура электролита в области контакта мостика с поверхностью анода достигает точки кипения. Поскольку температура электролита продолжает быстро возрастать, то условия не соответствуют равновесному пузырьковому кипению и имеет место перегрев локальной микроскопической области электролита в месте контакта мостика с поверхностью анода. Величина перегрева, достаточная для реализации механизма взрывного вскипания воды при атмосферном давлении, не превышает 205 °С [352]. В конечном итоге подведенной энергии оказывается достаточно для преодоления фазового барьера – дополнительные электролитные мостики, а затем и основной электролитный мостик взрываются (рис. 4.8, г). В электрической цепи появляется импульс тока, представляющий собой композицию из импульса тока от единичного основного мостика и многочисленных импульсов тока от дополнительных мостиков (рис. 4.9).

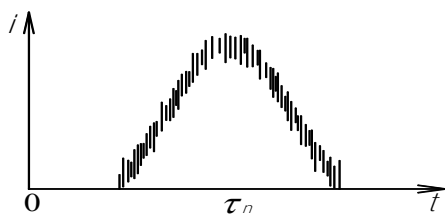


Рис. 4.9. Структура единичного импульса электрического тока в ПГО в момент времени τ_n

Таким образом, высокочастотный сигнал электрического тока, наблюдаемый на экране осциллографа, является следствием коммутации ПГО дополнительными электролитными мостиками, эмитированными с поверхности основного мостика.

Интересным фактом, установленным в ходе осциллографических исследований электрического тока (раздел 3.1.3.1) и требующим объяснения, является аномально высокая амплитуда импульсов тока от дополнительных электролитных мостиков, замыкающих ПГО. Известно [268, 328], что водные растворы электролита являются проводниками электрического тока II рода, в которых ток обеспечивается перемещением положительно и отрицательно заряженных ионов под действием электрического поля. Сила общего тока, равная сумме токов, вызванных противоположным движением катионов и анионов электролита, зависит от подвижности ионов. При одинаковых условиях подвижности большинства ионов мало отличаются друг от друга за исключением ионов водорода и ионов гидроксидов, подвижность которых выше в 3–8 раз [328]. Подвижность ионов существенно зависит от вязкости раствора, которая, в свою очередь, зависит от температуры раствора. Повышение температуры электролита вызывает снижение вязкости раствора и, следовательно, повышает подвижность ионов. С другой стороны, скорость движения иона в растворе под действием внешнего электрического поля ограничивается силой трения, связанной с существованием ионной атмосферы, окружающей ион и перемещающейся в сторону, противоположную движению иона. Этот эффект торможения назван электрофоретическим эффектом [328]. На скорость движения иона также оказывает влияние релаксационный эффект, связан-

ный с образованием и разрушением ионной атмосферы при движении иона [328]. В условиях ЭИП в момент касания дополнительным электролитным мостиком поверхности анода температура электролита в мостике резко возрастает за счет джоулева нагрева. Это приводит к резкому снижению вязкости раствора электролита в локальном объеме дополнительного мостика и к значительному повышению подвижности ионов. Кроме того, при напряженности электрического поля в области дополнительного мостика порядка 10^7 В/м реализуется эффект Вйна [328], который заключается в том, что при напряженности электрического поля свыше 10^5 В/м движущийся ион выходит за пределы ионной атмосферы, которая не успевает вновь образовываться в каждом новом месте нахождения иона и ее тормозящий эффект на скорость движения иона не проявляется. В результате, электропроводность электролита в мостике резко возрастает и достигает предельно возможной величины для данного раствора. Таким образом, совокупным действием высокой температуры электролита в локальном объеме мостика и реализацией эффекта Вйна можно объяснить аномально высокую амплитуду импульсов электрического тока при замыкании ПГО дополнительными электролитными мостиками. При пробое ПГО основными электролитными мостиками расчетная напряженность электрического поля в этих локальных областях ПГО составляет $4 \cdot 10^5$ – $2 \cdot 10^6$ В/м. Следовательно, и в этом случае возможна реализация эффекта Вйна.

Взрывы основного и дополнительных электролитных мостиков сопровождаются ударной волной и образованием микроскопического парогазового пузырька в ПГО (рис. 4.8, *д*). Под действием ударной волны давление на электролит со стороны ПГО резко возрастает и электролит, граничащий с ПГО в этой локальной области, отбрасывается от поверхности анода. Толщина ПГО в этой области увеличивается (рис. 4.8, *е*). В тонком приграничном слое электролита зарождается микропоток. В начальный момент времени скорость движения микропотока достаточно высока, что вызывает снижение давления в микропотоке. На некотором расстоянии от ПГО в результате снижения скорости движения микропотока под действием сил трения давление в микропотоке повышается до уровня давления в основном объеме электролита в этой локальной области. Перепад давлений может привести к возникновению в прианодной области электролита гидродинамической кавитации. Кавитационный пузы-

рек, перемещаясь с микропотоком в область с более высоким давлением, схлопывается, излучая при этом ударную волну. Совокупное действие ударных волн от взрывов электролитных мостиков и от схлопывания кавитационных пузырьков способствует возникновению вибрации ПГО и формированию гидродинамических потоков в электролите.

При взрыве электролитных мостиков в ПГО попадают водяной пар, растворенные в электролите газы, нейтральные кластеры, состоящие преимущественно из молекул воды, а также молекулы компонентов раствора электролита и заряженные частицы (ионы). Отрицательно заряженные ионы под действием электрического поля начинают двигаться в ПГО в направлении анода, а положительно заряженные ионы в направлении катода (электролита). В ПГО возникает электрический ток, вызванный ионной проводимостью газовой фазы ПГО.

Авторы работ [112, 205, 353, 354] представляют ПГО в виде эквивалентной электрической схемы, включающей конденсатор $C_{\text{ПГО}}$ с параллельно подключенным к нему нелинейным сопротивлением. По данным [112, 353], удельная емкость ПГО составляет 150–300 пФ/см². В условиях ЭИП зарождение основных электролитных мостиков является статистически независимыми случайными событиями. При этом основные электролитные мостики могут иметь разные размеры и, соответственно, разную величину электрического сопротивления $R_1; R_2; \dots; R_n$. Тогда, учитывая пренебрежимо малую величину электрического сопротивления металлического анода (раздел 2.3.4), систему «металлический анод–ПГО–электролит» можно представить в виде эквивалентной электрической схемы (рис. 4.10, а), для которой в общем случае справедливо неравенство:

$$R_{\text{ПГО}} \neq R_1 \neq R_2 \neq \dots \neq R_n,$$

где $R_{\text{ПГО}}$ – электрическое сопротивление газовой фазы ПГО; $R_1; R_2; \dots; R_n$ – электрическое сопротивление соответственно 1-, 2- и n -го электролитного мостика.

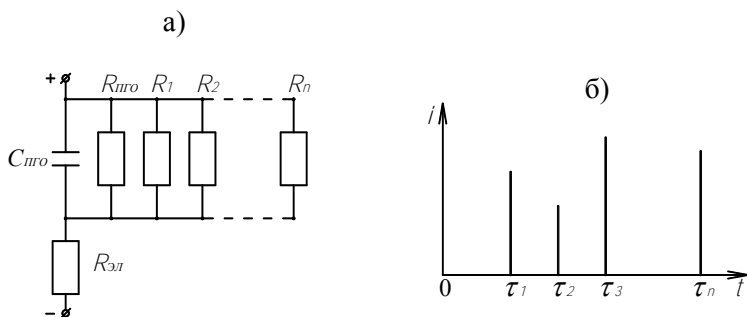


Рис. 4.10. Эквивалентная электрическая схема (а) системы «анод–ПГО–электролит» и схема (б) единичных импульсов тока

Сила электрического тока в газовой фазе ПГО определяется величиной ее электрического сопротивления $R_{\text{ПГО}}$ и напряжением, приложенным к ПГО. Из эквивалентной электрической схемы (рис. 4.10, а) следует, что постоянная составляющая тока, протекающего через ПГО и входящая в выражение (4.48) как $I_0/2$, обусловлена ионной проводимостью газовой фазы ПГО. Оценим величину электрического сопротивления газовой фазы ПГО $R_{\text{ПГО}}$ для условий проведения процесса ЭИП, при которых был получен спектр тока, представленный на рис. 3.17. В соответствии с законом Ома и принятым в разделе 4.2.1 допущением, согласно которому постоянная составляющая тока $I_0/2 = 0,049$ А, сопротивление газовой фазы ПГО равно 6122 Ом. Тогда для данных условий обработки вклад ионного тока в газовой фазе ПГО в суммарный ток, протекающий через оболочку, незначителен и составляет около 0,7 %.

Основные электролитные мостики, электрически замыкая ПГО в моменты времени $\tau_1; \tau_2; \tau_3; \dots; \tau_n$ (рис. 4.10, б), шунтируют электрическое сопротивление газовой фазы ПГО $R_{\text{ПГО}}$ и вызывают появление в электрической цепи импульсов тока, обусловленных ионной проводимостью электролита. На рис. 4.10, б они условно представлены в виде коротких импульсов с разной амплитудой. Очевидно, что основные электролитные мостики могут зарождаться с равной вероятностью в одинаковые моменты времени на разных участках поверхности электролита, граничащего с ПГО. Следовательно, электрические сопротивления отдельных электролитных

мостиков оказываются подключенными параллельно, что приводит к снижению суммарного сопротивления ПГО и к росту силы тока в электрической цепи в соответствии с законом Ома. Этот эффект наглядно проявляется при увеличении площади обрабатываемой поверхности.

Таким образом, так называемая “постоянная” составляющая электрического тока, фиксируемая осциллографом и амперметром постоянного тока, на самом деле представляет собой композицию из ионного тока в газовой фазе ПГО и суммарного тока от перекрывающихся во времени импульсов тока от единичных основных электролитных мостиков, коммутирующих ПГО с частотой около 0,01–0,9 кГц. На рис. 4.11 представлена схема, поясняющая эффект перекрытия во времени импульсов тока от единичных основных электролитных мостиков.

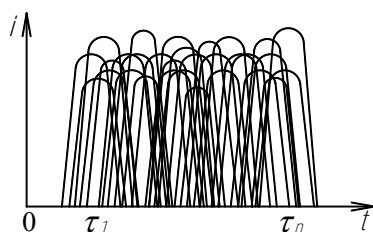


Рис. 4.11. Эффект перекрытия импульсов тока во времени

В пользу предложенной модели коммутационного механизма электрической проводимости ПГО свидетельствует комбинированная обработка – ЭИП с наложением ультразвуковых колебаний [355]. Схема устройства для реализации комбинированной обработки по патентам Республики Беларусь 8010 [356] и 18112 [357] представлена на рис. 4.12. ЭИП плоских образцов размером 40x40x3 мм из коррозионностойкой стали 12X18Н10Т проводилось в течение 3 мин в 5%-м водном растворе сульфата аммония при температуре электролита 70–95 °С и напряжении обработки 300 В. Введение в электролит ультразвуковых колебаний с частотой 44 кГц позволило интенсифицировать анодные процессы, протекающие на обрабатываемой поверхности, вследствие чего удельный съем металла уве-

личился на 39 % по сравнению с обработкой без наложения ультразвуковых колебаний.

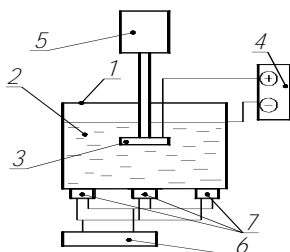


Рис. 4.12. Схема устройства для ЭИП с наложением ультразвуковых колебаний:

- 1 – корпус ванны, 2 – электролит, 3 – образец, 4 – источник технологического тока, 5 – привод подвески, 6 – генератор электрических колебаний, 7 – излучатели ультразвуковых колебаний

В рамках предложенной концептуальной модели можно объяснить разнообразные физические явления, наблюдаемые при реализации процесса ЭИП, например, появление звука с частотой около 0,4–0,7 кГц. При увеличении площади обрабатываемой поверхности высота звука не меняется, но уровень звука возрастает. Низкочастотные звуковые колебания возникают в результате воздействия на электролит ударных волн от взрывов электролитных мостиков, коммутирующих ПГО. Колебания, возникшие в электролите, передаются на стенки ванны установки ЭИП и далее в воздух в виде звуковых колебаний. Чем больше площадь обрабатываемой поверхности, тем больше электролитных мостиков, замыкающих ПГО, и выше уровень звука. Высота звука зависит от того, с какой преобладающей частотой основные электролитные мостики коммутируют ПГО.

Таким образом, в условиях ЭИП электрический ток протекает в ПГО вследствие ионной проводимости электролита в электролитных мостиках, замыкающих ПГО, и ионной проводимости газовой фазы ПГО. Основной вклад в суммарный ток вносят электролитные мостики. Вклад ионного тока в газовой фазе ПГО в суммарный ток незначителен. Квазипостоянная составляющая электрического тока представляет собой композицию из тока в газовой фазе ПГО и сум-

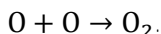
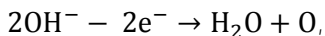
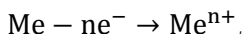
марного тока от перекрывающихся во времени импульсов тока от основных электролитных мостиков, коммутирующих ПГО с частотой около 0,01–0,9 кГц. Высокочастотная составляющая тока (около 2,5 МГц) является составной частью импульсов тока от основных электролитных мостиков. Аномально высокая электропроводность электролита в электролитных мостиках обусловлена высокой подвижностью ионов вследствие сверхбыстрого разогрева электролита джоулевым теплом и реализацией эффекта Вина, проявляющегося при напряженности электрического поля свыше 10^5 В/м. Образование и обновление ПГО не связано с пузырьковым или пленочным кипением электролита, а вызвано тепловым взрывным механизмом разрушения электролитных мостиков. Вибрация ПГО и самоорганизованные гидродинамические потоки в объеме электролита являются результатом воздействия на приграничный с ПГО слой электролита ударных волн от взрывов электролитных мостиков и схлопывания кавитационных пузырьков в микропотоках в тонком приграничном с ПГО слое электролита.

4.4. Анодные процессы и механизмы анодного растворения низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей в условиях электроимпульсного полирования

В связи с недостатком и противоречивостью имеющейся в литературе информации о возможных электрохимических и химических реакциях, протекающих на поверхности анода в условиях ЭИП, в ПГО и электролите, значительно затруднена разработка технологий ЭИП различных по химическому составу и свойствам металлов и сплавов. Как следствие, в настоящее время состав раствора электролита подбирается опытным путем [125, 126, 129, 137–142, 205]. При этом критериями правильности выбора состава служат: снижение исходной шероховатости поверхности, повышение ее отражательной способности и отсутствие визуально наблюдаемых пленок на полированной поверхности.

Согласно одной из немногочисленных гипотез [358], в водном растворе электролита в условиях электролитно-разрядного режима обработки механизм ионизации (окисления) металла реализуется следующим образом. На катоде происходит восстановление катионов водорода H^+ или разложение молекул воды с выделением газо-

образного водорода. На аноде ионизация металла и выделение газообразного кислорода протекают по следующим схемам



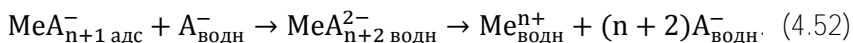
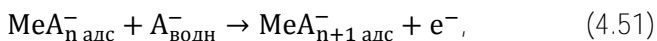
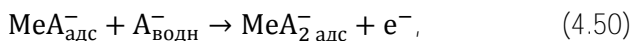
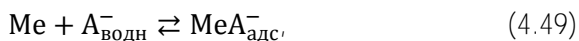
По мнению авторов работы [358], в прианодной области в электролите происходит необратимая реакция между гидроксильными ионами OH^- и катионами металла $\text{Me}^{\text{n}+}$ с образованием нерастворимых в воде гидроксидов металла (шлама). В случае обработки сталей это гидроксиды двух- и трехвалентного железа $\text{Fe}(\text{OH})_2$; $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и хрома $\text{Cr}(\text{OH})_3$. Очевидно, что предложенный механизм ионизации металла не учитывает комплекса факторов, влияющих на характер анодных процессов, представляет собой известную формальную схему без детализации промежуточных элементарных стадий и не отражает сути протекающих на аноде процессов.

Известно [327, 328, 332, 333], что процесс анодного растворения металлов и сплавов является гетерогенным процессом, происходящим на границе раздела фаз «металл–электролит» и состоящим из ряда одновременно протекающих последовательных или последовательно-параллельных элементарных стадий. При этом общая скорость гетерогенного процесса определяется скоростью лимитирующей стадии. Для взаимодействия реагентов в гетерогенной системе необходим перенос вещества из одной фазы в другую. При анодном растворении конкретный характер анодных процессов определяется природой металла (сплава), анионным составом и pH раствора электролита и величиной анодного потенциала [40, 43, 45, 327].

Согласно современным общепринятым представлениям об анодном растворении металлов по механизму комплексообразования с переходом в раствор простых ионов, ионизация металла начинается с образования комплекса металла с анионами раствора путем адсорбции анионов и (или) молекул воды на поверхности металла [327, 332, 333, 359, 360]. В роли анионов могут также выступать

гидроксильные ионы OH^- [40, 327, 359]. Поверхностные адсорбционные комплексы могут образовываться как под действием Ван-дер-Ваальсовых сил, так и в результате протекания электрохимических или химических реакций. Образовавшиеся комплексы металла с анионами раствора могут быть промежуточными соединениями, которые в конечном итоге распадаются в растворе электролита на простые ионы или на продукты гидролиза. Полученные нами экспериментальные данные о содержании хлора и серы в поверхностных пленках (раздел 3.2.4) свидетельствуют о том, что при ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей в водных растворах солей аммония анодное растворение компонентов сталей, в частности железа, происходит с непосредственным участием анионов растворов электролитов [286].

Согласно [327], в галоидных растворах ионизация металлов до степени окисления Me^{n+} может происходить по следующей схеме



В соответствии со схемой (4.49)–(4.52), на первой быстрой стадии (4.49) происходит обратимая адсорбция аниона раствора электролита $\text{A}_{\text{водн}}^-$ на поверхности металла Me . Затем на медленных стадиях (4.50) и (4.51) по электрохимическому процессу происходит последовательное присоединение к образованному комплексу $\text{MeA}_{\text{адс}}^-$ дополнительных $(n-1)$ анионов $\text{A}_{\text{водн}}^-$ с потерей $(n-1)$ электронов до образования адсорбционного комплекса $\text{MeA}_{n+1\text{ адс}}^-$ со степенью окисления металла Me^{n+} . На поверхности анода формируется однофазная твердая солевая пленка $\text{Me}|\text{MeA}_{n+1\text{ адс}}^-$. На завершающей медленной стадии (4.52) происходит переход адсорбционного комплекса $\text{MeA}_{n+1\text{ адс}}^-$ в раствор электролита с последующим его распадом на простые ионы. Если скорость растворения со-

левой пленки больше скорости ее образования, то металл растворяется в активной области. В обратном случае наступает солевая пассивация и металл растворяется в пассивном состоянии.

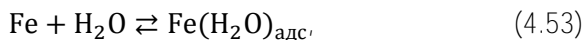
В работе [333] экспериментально установлено, что на первых стадиях растворения железа в галоидных или сульфатных растворах на поверхности железа происходит образование как адсорбционных комплексов $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}$ с участием хемосорбированных молекул воды, так и короткоживущих адсорбционных комплексов $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{Cl}_{\text{адс}}^-$ или $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{SO}_4^{2-}$ с участием хлорид- или сульфат-ионов. По данным [333], поверхностные адсорбционные комплексы «металл–вода» образуются на свежесформированной поверхности в водном растворе в течение 0,4 мс для железа и 0,7 мс для никеля.

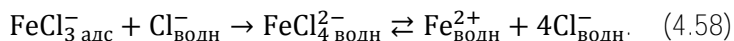
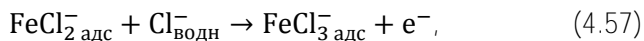
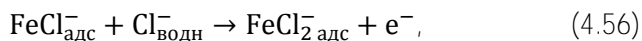
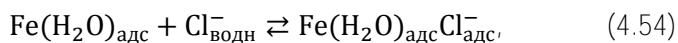
В разделе 3.1.3.2 показано, что при ЭИП в результате замыкания ПГО основными электролитными мостиками в электрической цепи возникают низкочастотные колебания электрического тока, основные гармоники которого сосредоточены в области частот от 0,01 до 0,7 кГц (рис. 3.17–3.19 и 3.21). Продолжительность контакта основных электролитных мостиков с поверхностью анода можно определить из выражения

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

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

Продолжительность контакта одного электролитного мостика с поверхностью анода примем равной половине периода колебаний электрического тока. Тогда численная оценка продолжительности контакта основных электролитных мостиков с поверхностью анода дает величину равную 0,71–50,0 мс. Как видно, этого времени достаточно для образования поверхностных адсорбционных комплексов «металл–вода». Следовательно, растворение железа при ЭИП низколегированных углеродистых сталей в водном растворе хлорида аммония может протекать по уточненной схеме и включает следующие стадии





Растворение железа, согласно предложенной нами схемы (4.53)–(4.58), происходит в результате протекания ряда последовательных и параллельных стадий. Первоначально по реакции (4.53) на поверхности железа хемосорбируются молекулы воды с образованием гидрокомплекса железа $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}$. Затем на одновременно протекающих быстрых параллельных стадиях (4.54) и (4.55) происходит взаимодействие адсорбционного комплекса $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}$ с хлорид-ионами $\text{Cl}^-_{\text{водн}}$, в результате чего образуются короткоживущие адсорбционные комплексы $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{Cl}^-_{\text{адс}}$ и прочные адсорбционные комплексы $\text{FeCl}^-_{\text{адс}}$. Поверхностный комплекс $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{Cl}^-_{\text{адс}}$ по сравнению с комплексом $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}$ обладает пониженной стойкостью вследствие деформации связей под влиянием отрицательного заряда аниона Cl^- [333]. Далее следуют последовательные медленные электрохимические стадии (4.56) и (4.57), аналогичные стадиям (4.50) и (4.51), записанным в общем виде. На поверхности железа формируется солевая пленка $\text{Fe}|\text{FeCl}^-_{3\text{ адс}}$. На завершающей быстрой стадии (4.58) происходит образование и переход в раствор электролита хорошо растворимого в воде адсорбционного комплекса $\text{FeCl}^{2-}_{4\text{ водн}}$ с последующим его распадом на простые ионы $\text{Fe}^{2+}_{\text{водн}}$ и $\text{Cl}^-_{\text{водн}}$.

Для объяснения анодного растворения железа в сульфатных растворах по механизму комплексообразования предложено несколько схем [40, 327, 332, 333]. Их основной отличительной особенностью является первая стадия ионизации – стадия адсорбции. Предполагается, что на поверхности железа первоначально адсорбируются либо гидроксильные ионы OH^- , либо сульфат-ионы SO^{2-}_4 , либо моле-

кулы воды H_2O . При этом в [327, 332, 333] отмечается, что при растворении железа в нейтральных и кислых растворах адсорбция гидроксильных ионов OH^- на поверхности железа затруднена.

При ЭИП коррозионностойких и низколегированных углеродистых сталей обработка проводится при температуре электролита свыше $60^\circ C$ в кислых растворах соответственно сульфата и хлорида аммония с $pH < 5,5$ (рис. 4.13).

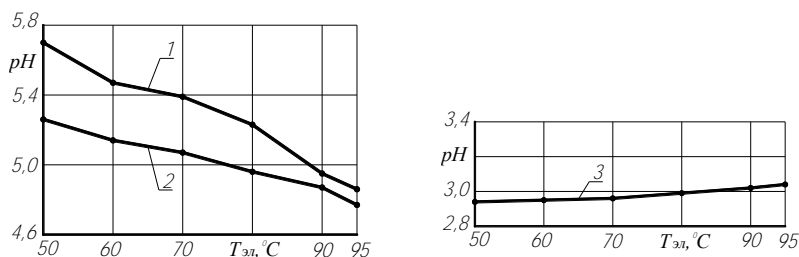


Рис. 4.13. Зависимость pH раствора электролита от температуры.

Состав водного раствора:

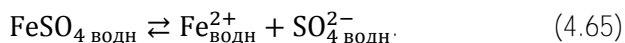
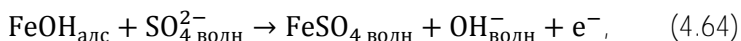
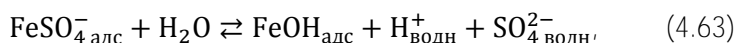
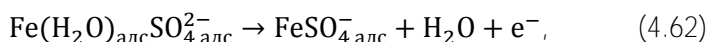
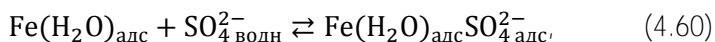
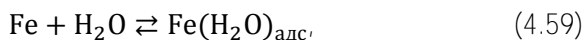
1 – 2 масс.% хлорида аммония; 2 – 5 масс.% сульфата аммония;

3 – 5 масс.% сульфата аммония и 1,5 масс.% лимонной кислоты

Следует отметить, что в условиях ЭИП при прохождении через раствор электролита некоторого количества электричества pH раствора снижается, т.е. раствор дополнительно подкисляется. Согласно данным [207], 4%-й водный раствор сульфата аммония, через который прошло $6 \text{ А}\cdot\text{ч/л}$, имел $pH = 2,2\text{--}2,4$.

Ранее было показано, что при ЭИП коррозионностойких сталей в сверхтонких поверхностных пленках наряду с оксидами железа, хрома, никеля и титана присутствует кислород в количестве 5,7–11,0 масс.% (табл. 3.6 и 3.7) [287, 288]. Данный факт подтверждает вероятность адсорбции на поверхности анода молекул воды. Наличие серы или ее соединений в сверхтонких поверхностных пленках не установлено. Однако сера обнаружена в поверхностных пленках при определенных условиях проведения процесса ЭИП (рис. 3.42, а) [286, 320]. Учитывая эти данные, величину pH раствора электролита и работы [327, 333], можно утверждать, что при ЭИП коррозионностойких сталей в водном растворе сульфата аммония на поверхности железа первоначально адсорбируются молекулы воды, а рас-

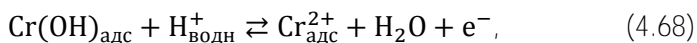
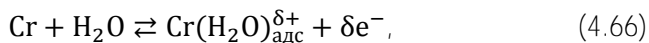
творение железа может происходить по уточненной схеме и включает следующие стадии



В отличие от схемы, представленной в [327], в предложенной нами схеме (4.59)–(4.65) на первой быстрой стадии (4.59) на поверхности железа хемосорбируются молекулы воды с образованием гидрокомплекса железа $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}$. Затем на быстрой стадии (4.60) происходит взаимодействие сульфат-иона $\text{SO}_4^{2-}_{\text{водн}}$ с хемосорбированной молекулой воды с образованием короткоживущего адсорбционного комплекса $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{SO}_4^{2-}_{\text{адс}}$. Прочный адсорбционный комплекс $\text{FeSO}_4^{-}_{\text{адс}}$ образуется на последующих медленных одновременно протекающих параллельных стадиях (4.61) и (4.62) по электрохимическому процессу с отдачей аноду одного электрона. Далее на быстрой стадии (4.63) происходит гидролиз адсорбционного комплекса $\text{FeSO}_4^{-}_{\text{адс}}$ с образованием адсорбционного комплекса $\text{FeOH}_{\text{адс}}$, который на следующей медленной стадии (4.64) взаимодействует с сульфат-ионом $\text{SO}_4^{2-}_{\text{водн}}$ и отдает аноду один электрон, в результате чего образуется растворимая соль железа FeSO_4 , которая в растворе диссоциирует по реакции (4.65) на простые ионы $\text{Fe}^{2+}_{\text{водн}}$ и $\text{SO}_4^{2-}_{\text{водн}}$.

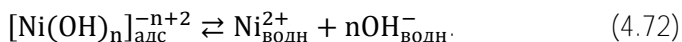
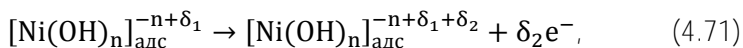
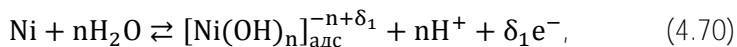
При ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей анодное растворение хрома и никеля по механизму ком-

плексообразования может происходить следующим образом. В условиях первоначальной хемосорбции молекул воды на поверхности металлов могут образовываться адсорбционные комплексы $\text{Me}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}^{\delta+}$, называемые поверхностными комплексами с переносом заряда [333, 359]. В этих комплексах электроны адсорбированных молекул воды $(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}^{\delta+}$ частично обобществлены с электронным газом металла за счет потери молекулой воды части заряда электрона δ ($0 < \delta < 1$). Основываясь на этом общепризнанном положении, растворению хрома при ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей в водных растворах солей аммония в условиях первичной хемосорбции молекул воды на поверхности хрома может соответствовать следующий механизм [333]



В соответствии со схемой (4.66)–(4.69), ионизация хрома протекает ступенчато по электрохимическим процессам. На первой быстрой стадии (4.66) на поверхности хрома образуется адсорбционный гидрокомплекс хрома $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}^{\delta+}$, в котором молекула воды $(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}^{\delta+}$ отдала аноду часть заряда электрона δ . Частичный перенос заряда с молекулы воды на металл ослабляет O–H-связи в адсорбированных молекулах воды и облегчает их диссоциацию на стадии (4.67) [333]. На поверхности хрома образуется адсорбционный комплекс $\text{Cr}(\text{OH})_{\text{адс}}$. На третьей стадии (4.68) в результате взаимодействия поверхностного комплекса $\text{Cr}(\text{OH})_{\text{адс}}$ с катионом водорода $\text{H}_{\text{водн}}^{+}$ образуется адсорбированный ион хрома промежуточной валентности $\text{Cr}_{\text{адс}}^{2+}$, который на заключительной медленной стадии (4.69) окисляется и переходит в раствор в виде иона трехвалентного хрома $\text{Cr}_{\text{водн}}^{3+}$.

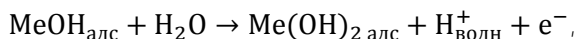
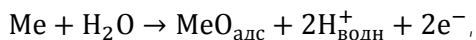
При ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей в водных растворах солей аммония анодные процессы на поверхности никеля в условиях первичной хемосорбции молекул воды могут быть описаны следующей схемой [359]



Растворение никеля по схеме (4.70)–(4.72) протекает через ряд последовательных стадий. Процесс растворения начинается по реакции (4.70) с диссоциативной адсорбции молекул воды, которая совмещена с образованием поверхностных гидроксидных адсорбционных комплексов $[\text{Ni}(\text{OH})_n]_{\text{адс}}^{-n+\delta_1}$ и потерей части заряда электрона δ_1 . Затем на медленной электрохимической стадии (4.71) происходит дальнейшее окисление комплексов $[\text{Ni}(\text{OH})_n]_{\text{адс}}^{-n+\delta_1}$ с потерей части заряда электрона δ_2 . Если на стадиях (4.70) и (4.71) поверхностный гидроксидный комплекс теряет только часть заряда $\delta_m < 2$, то стадий (4.71) будет столько, пока общая потеря заряда не окажется равной двум. Тогда наступает завершающая быстрая стадия (4.72), на которой происходит разрушение поверхностного адсорбционного комплекса $[\text{Ni}(\text{OH})_n]_{\text{адс}}^{-n+2}$ с переходом в раствор простых ионов $\text{Ni}_{\text{водн}}^{2+}$ и $\text{OH}_{\text{водн}}^-$.

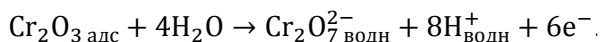
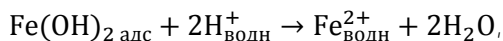
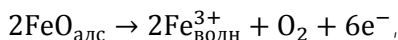
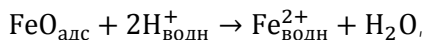
Таковы механизмы анодного растворения основных компонентов низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей при ЭИП в водных растворах хлорида и сульфата аммония. Следует отметить, что неотъемлемой частью анодного растворения сталей являются вторичные анодные процессы, вносящие дополнительный вклад в растворение компонентов сталей, а также процессы, непосредственно не связанные с ионизацией атомов кристаллической решетки металлов. Рассмотрим основные из них, вероятность протекания которых высока в условиях ЭИП в водных растворах солей аммония.

Образование оксидов и гидроксидов металлов на поверхности анода возможно по электрохимическому процессу [327]

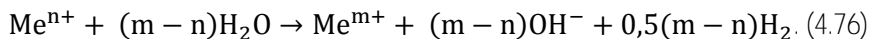
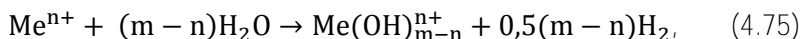
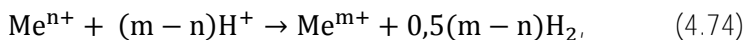
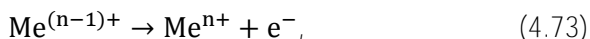


Факт образования на поверхности оксидов железа, хрома, никеля, титана и гидроксидов железа при ЭИП коррозионностойких и низколегированных углеродистых сталей подтверждают наши экспериментальные данные, представленные в табл. 3.6 и 3.7 и на рис. 3.35 и 3.41. Следовательно, теперь можно с полной уверенностью говорить о том, что основная поверхностная пленка темно-серого цвета и рыхлое объемное новообразование черного цвета на поверхности стали 20 (рис. 3.35) представляют собой оксид железа $\text{FeO}_{\text{адс}}$, а основная поверхностная пленка бурого цвета на поверхности стали 20X13 (рис. 3.41) состоит преимущественно из гидроксида трехвалентного железа $\text{Fe}(\text{OH})_{3\text{ адс}}$. При этом расположенные в ней небольшие темные включения представляют собой оксид железа $\text{FeO}_{\text{адс}}$ [286].

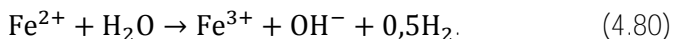
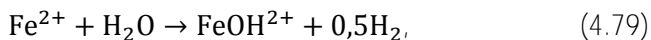
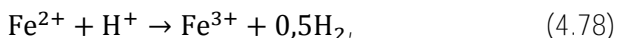
Образовавшиеся на поверхности оксиды и гидроксиды металлов могут растворяться по химическому или электрохимическому процессам, например



В условиях ЭИП образующиеся ионы металлов промежуточной валентности окисляются либо непосредственно на поверхности анода, либо в прианодной области электролита за счет взаимодействия с катионами водорода $H_{\text{водн}}^+$ или с молекулами воды по следующим реакциям

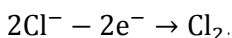
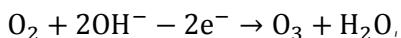
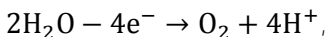


Применительно к растворению железа при ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей реакции, описанные в общем виде формулами (4.73)–(4.76), можно представить в виде

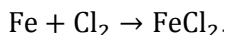
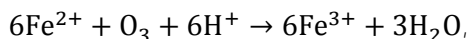
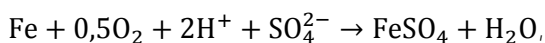


Правомерность реакций (4.77)–(4.80) подтверждают наши экспериментальные данные, представленные в табл. 3.6 и 3.7 [287, 288]. В сверхтонких поверхностных пленках на коррозионностойких сталях присутствуют малорастворимые и нерастворимые в воде соединения двух- и трехвалентного железа.

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



В свою очередь, выделение на аноде кислорода, озона и хлора создает возможность протекания химических реакций, например

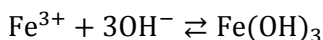


В условиях ЭИП в водных растворах солей аммония образование гидроксидов железа, хрома и никеля имеет особенности, связанные с величиной pH растворов электролита. В табл. 4.2 приведены значения pH осаждения гидроксидов железа, хрома и никеля.

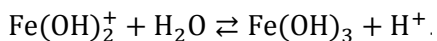
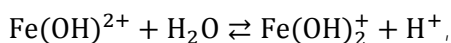
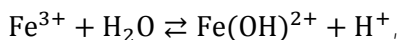
Таблица 4.2 – pH осаждения гидроксидов железа, хрома и никеля

Me(OH) _n	pH гидратообразования	
	По данным [40]	По данным [207]
Fe(OH) ₂	5,5	7,5–8,0
Fe(OH) ₃	2,0	2,1–2,45
Cr(OH) ₃	5,3	4,55–4,85
Ni(OH) ₂	8,0	5,9–6,35

Из данных, представленных в табл. 4.2 и на рис. 4.13 (кривые 1 и 2), следует, что при ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей в водных растворах хлорида и сульфата аммония образование трудно растворимых гидроксидов железа, хрома и никеля и их выпадение в осадок в виде шлама возможно только для трехвалентного железа. Гидроксид трехвалентного железа может образовываться непосредственно по химической реакции



или благодаря гидролизу:



При значениях рН, характерных для процесса ЭИП коррозионностойких сталей в водном растворе сульфата аммония, образование трудно растворимых гидроксидов хрома и никеля невозможно, что приводит к непрерывному накоплению в растворе ионов хрома и никеля и постепенному снижению полирующей способности электролита.

При ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей в водных растворах хлорида и сульфата аммония анионы электролита играют двоякую роль в механизмах анодного растворения железа. При повышении концентраций хлорида аммония от 1,0 до 4,0 масс.% и сульфата аммония от 2,0 до 6,0 масс.% хлорид- и сульфат-ионы оказывают активирующее действие на процесс растворения железа за счет легкого образования по реакциям (4.54) и (4.60) нестабильных поверхностных адсорбционных комплексов $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{Cl}_{\text{адс}}^-$ и $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{SO}_4^{2-}$, которое выражается в росте величины удельного съема металла (рис. 4.14). Дальнейшее повышение концентраций хлорида и сульфата аммония при низких значениях рН растворов способствует более активному вы-

теснению хлорид- и сульфат-ионами адсорбированных молекул воды с поверхности железа и активному образованию прочных адсорбционных комплексов $\text{FeCl}_{\text{адс}}^-$ и $\text{FeSO}_{4\text{ адс}}^-$, которые блокируют активные центры на анодной поверхности, замедляя процесс растворения железа.

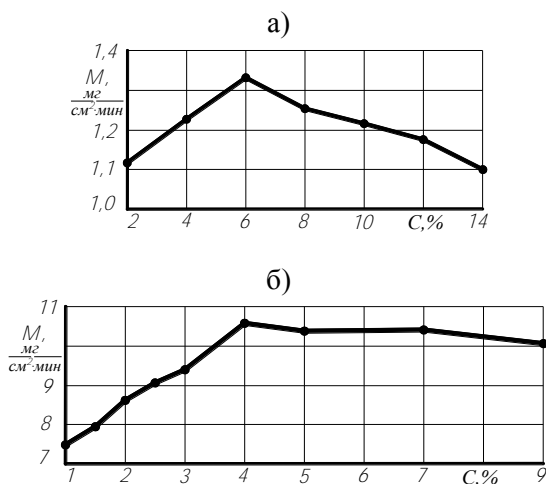


Рис. 4.14. Зависимость удельного съема металла от концентрации раствора:
а – сульфат аммония (сталь 20X13), *б* – хлорид аммония (сталь 20)
 ($U=310$ В; $T_{\text{эл}}=70$ °С)

В более концентрированных растворах солей аммония также более заметным становится ингибирующее действие фазовых оксидных и гидроксидных поверхностных пленок, которые механически экранируют отдельные участки анодной поверхности. Иными словами, при ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионно-стойких сталей повышение концентраций хлорида и сульфата аммония выше некоторых значений приводит к пассивации поверхности анода. Этот эффект более выражен у коррозионно-стойких сталей. Так, при ЭИП стали 20X13 повышение концентрации сульфата аммония с 6,0 до 14,0 масс.% приводит к снижению удельного съема металла на 22 % (рис. 4.14, *а*), в то время как при ЭИП стали 20 повышение концентрации хлорида аммония с 4,0 до 9,0 масс.% снижает удельный съем металла лишь на 5 % (рис. 4.14, *б*) [320, 322].

Влияние лимонной кислоты на анодные процессы при ЭИП коррозионностойких сталей определяется ее способностью растворять гидроксиды и оксиды двух- и трехвалентного железа, а также оксиды хрома и никеля и переводить эти металлы в прочные водорастворимые комплексы. По этой причине при ЭИП коррозионностойких сталей в двухкомпонентном растворе [317], содержащем сульфат аммония и лимонную кислоту в исследованных концентрациях, удельный съем металла выше в 2,5–5,6 раз по сравнению с обработкой в однокомпонентном растворе (рис. 4.15) [320].

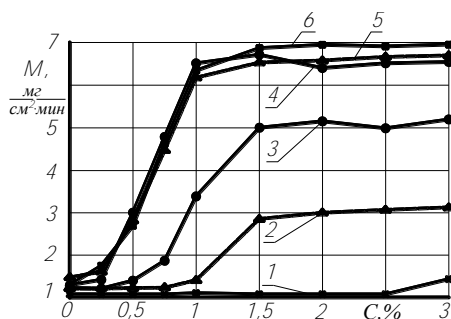


Рис. 4.15. Зависимость удельного съема металла от концентрации лимонной кислоты в водном растворе сульфата аммония при ЭИП стали 20Х13 при концентрации сульфата аммония, масс. %:
 1–2; 2–3; 3–3,5; 4–4; 5–6; 6–10
 ($U=310$ В; $T_{эл}=70$ °С)

При введении лимонной кислоты в раствор хлорида аммония при ЭИП низколегированных углеродистых сталей этот эффект не проявляется, что связано с более высоким по сравнению с лимонной кислотой активирующим действием хлорид-ионов в процессах растворения железа и его оксидов. Эти факты в совокупности с приведенными выше экспериментальными данными подтверждают адекватность предложенных механизмов растворения компонентов низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей при ЭИП в водных растворах хлорида и сульфата аммония.

Таким образом, при ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей съем металла происходит за счет протекания анодных процессов на обрабатываемой поверхности.

Анодное растворение металлов, входящих в состав низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей, происходит в области смешанной электрохимической и диффузионной кинетики по механизму комплексообразования через ряд последовательных или последовательно-параллельных промежуточных стадий. На первой стадии растворения на поверхности металлов образуются адсорбционные комплексы с участием хемосорбированных молекул воды. В последующих стадиях принимают участие анионы раствора электролита и (или) молекулы воды. На заключительной стадии на поверхности анода образуются растворимые в воде соединения, которые при переходе в раствор диссоциируют на простые ионы. Диффузионные ограничения возникают в результате затрудненного ионного массопереноса через поверхностные солевые, оксидные и гидроксидные адсорбционно-фазовые пленки. Анодное растворение железа при ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей в водных растворах хлорида и сульфата аммония происходит с непосредственным участием анионов раствора электролита – соответственно хлорид- и сульфат-ионов. Растворение хрома и никеля происходит через образование адсорбционных поверхностных комплексов с частичным переносом заряда электрона. В условиях ЭИП в растворении компонентов низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей значительную роль играют химические процессы.

4.5. Основы выбора состава раствора электролита для электроимпульсного полирования металлов и сплавов

В условиях ЭИП наблюдается тесная корреляция характера анодных процессов с электрохимическим поведением металла (сплава), анионным составом и рН водного раствора электролита и величиной напряжения обработки [127, 233, 270, 275, 286–288, 291, 292, 318–322, 324, 325]. При этом химический состав и рН раствора оказывают решающее влияние на характер анодных процессов, ход процесса анодного растворения металла или компонентов сплава и в значительной мере определяют производительность обработки и качество поверхности.

В настоящее время в промышленности, как было показано в разделе 1.3.1, в качестве электролита для ЭИП широко используются

однокомпонентные водные растворы. Двух- и трехкомпонентные растворы применяются значительно реже в связи со сложностью корректировки их состава вследствие неравномерной выработки отдельных компонентов растворов. Их использование целесообразно только в случаях, когда введение добавок в основной состав раствора позволяет выровнять скорости растворения всех компонентов сплава, снять диффузионные ограничения в поверхностных солевых, оксидных и гидроксидных адсорбционно-фазовых пленках и существенно повысить производительность и качество обработки. Примером оправданного применения двухкомпонентного раствора для ЭИП деталей из коррозионностойких сталей может служить обработка в водном растворе сульфата аммония с добавкой лимонной кислоты в количестве 0,5–3,0 масс.% [317]. Наряду с увеличением удельного съема металла в 2,5–5,6 раз (рис. 4.15) обеспечивается повышение скорости сглаживания шероховатости поверхности (рис. 4.16) и выравнивание скоростей растворения основных структурных составляющих коррозионностойких сталей [270, 291, 292]. В результате, повышается производительность обработки за счет сокращения продолжительности ЭИП и качество поверхности деталей.

На практике в ряде случаев, например, при ЭИП высокоточных деталей для обеспечения заданной точности обработки требуется снизить величину съема металла с поверхности, не ухудшая качества поверхности. Достичь этого можно, в частности, за счет выбора состава раствора электролита. Так, удельный съем металла можно снизить в 3,1–4,1 раза по сравнению с обработкой в 4%-м растворе сульфата аммония при ЭИП коррозионностойкой стали 20X13 в водном растворе, содержащем 2–18 масс.% одно- или двух-, или трехзамещенного лимоннокислого аммония или их смесь [318]). При этом относительное сглаживание шероховатости поверхности за 3 мин обработки составляет не менее 40–42 %, что соответствует обработке в 5%-м растворе сульфата аммония (рис. 4.16).

Очевидно, что основной предпосылкой при выборе состава раствора является возможность анодного растворения в нем конкретного металла или всех компонентов сплава. Для достижения высокого качества поверхности (низкой шероховатости и максимальной отражательной способности) и повышенной коррозионной стойкости необходимо обеспечить равномерность растворения основных компонентов сплава и примерное равенство скоростей образования

и растворения поверхностных солевых, оксидных и гидроксидных адсорбционно-фазовых пленок [286–288, 291, 292, 320, 322].

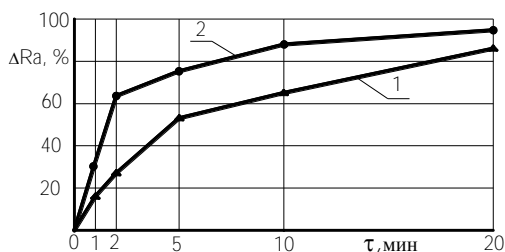


Рис. 4.16. Влияние добавки лимонной кислоты в 5%-й водный раствор сульфата аммония на относительное сглаживание шероховатости поверхности при ЭИП стали 20Х13.

Концентрация лимонной кислоты, масс. %:

1 – 0; 2 – 0,5

($U=300$ В; $T_{эл}=70$ °С; $R_{эф}^{нач}$ 1,3 мкм)

При выборе концентрации компонентов раствора необходимо учитывать физико-механические свойства и pH приготовленного раствора. Концентрация компонентов в растворе должна обеспечивать, с одной стороны, устойчивое протекание процесса ЭИП, а, с другой стороны, равномерность растворения основных структурных составляющих сплава и отсутствие визуально наблюдаемых поверхностных пленок. Следует также отметить, что компоненты раствора, включая добавки в основной состав раствора, должны быть термически устойчивыми [292, 361].

Таким образом, к растворам электролита для ЭИП предъявляются следующие основные требования:

- универсальность полирующего действия к различным компонентам и структурным составляющим сплава;
- высокая электропроводность и низкая вязкость раствора;
- высокая стойкость при повышенных температурах;
- стабильность основных свойств раствора после прохождения большого количества электричества;
- возможность использования в широком диапазоне технологических режимов обработки;

- отсутствие токсического воздействия электролита и продуктов его разложения на людей и окружающую среду;
- невысокая коррозионная активность по отношению к технологическому оборудованию и обрабатываемым деталям;
- компоненты раствора электролита должны быть доступны и дешевы.

Этим требованиям наилучшим образом соответствуют водные растворы неорганических солей.

5. МЕХАНИЗМ И ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ПОЛИРОВАНИИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, ХРОМА И НИКЕЛЯ

Качество поверхности деталей оказывает значительное влияние на их эксплуатационные характеристики [4, 11, 13, 23, 24, 31]. В технологии машиностроения под качеством обработанной поверхности понимают совокупность трех показателей: шероховатости и волнистости поверхности и физико-механических свойств поверхностного слоя [362]. В обеспечении эксплуатационных характеристик поверхности деталей большую роль играет процесс формирования топографии и упрочнение или разупрочнение поверхности, сопутствующее обработке [11, 13].

5.1. Механизм и основные технологические закономерности формирования профиля поверхности в условиях электроимпульсного полирования

Шероховатость поверхности детали при прочих равных условиях оказывает значительное влияние на ее эксплуатационные характеристики [11, 13]. Внедрение ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля в промышленных масштабах и отсутствие систематизированных экспериментальных данных о микрогеометрии обработанной поверхности потребовали провести комплексное исследование влияния технологических режимов ЭИП на формирование профиля поверхности. Исследование механизма и основных технологических закономерностей формирования профиля выполнялось двумя методами: путем изучения динамики изменения параметров шероховатости поверхности [271–276] и вероятностно-статистическим методом с помощью корреляционного преобразования профилограмм поверхности [282, 283].

Согласно данным, приведенным в работах [126, 149, 206, 222, 231, 239], основными факторами, влияющими на эффективность сглаживания шероховатости поверхности в процессе ЭИП, являются химический и фазовый состав обрабатываемого сплава, химический состав, концентрация и температура электролита, продолжи-

тельность обработки и уровень шероховатости исходной поверхности. Следует отметить, что перечисленные факторы находятся в сложной корреляции, причем изменение того или иного фактора может как положительно, так и отрицательно сказаться на эффективности сглаживания шероховатости. Так, например, зависимости удельного съема металла от концентрации электролита при ЭИП конструкционной углеродистой стали 20 и коррозионностойкой стали 20X13 имеют ярко выраженный экстремальный характер (рис. 4.14). По этим причинам, а также с целью определения оптимальной концентрации электролита, обеспечивающей наиболее эффективное сглаживание неровностей профиля поверхности при ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей, первоначально изучалось влияние концентрации растворов электролита на относительное сглаживание шероховатости поверхности ΔRa . На рис. 5.1 представлены графики, показывающие влияние концентрации электролита на относительное сглаживание шероховатости поверхности образцов из сталей 10 и 20X13 после ЭИП в течение 4 мин при напряжении обработки 300 В и температуре электролита 80 ± 1 °С [272, 274].

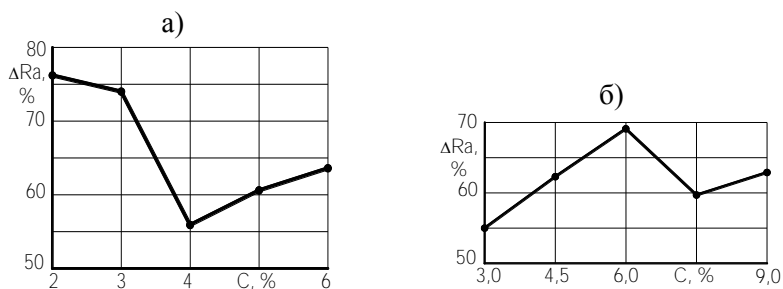


Рис. 5.1. Относительное сглаживание шероховатости поверхности после ЭИП в водном растворе хлорида (а) и сульфата (б) аммония:

а – сталь 10; $Ra^{нач}$ 0,33–0,48 мкм; б – сталь 20X13; $Ra^{нач}$ 0,40–0,62 мкм

Сравнительный анализ данных, представленных на рис. 5.1 и 4.14, с учетом ранее сделанного вывода (раздел 4.4) о влиянии концентрации хлорид- и сульфат-ионов на их активирующую или пассивирующую способность в механизмах анодного растворения железа позволил сделать вывод об оптимальных составах растворов

электролита: при ЭИП низколегированных углеродистых сталей оптимальным составом является 2%-й водный раствор хлорида аммония, при ЭИП коррозионностойких сталей – 6%-й водный раствор сульфата аммония. В дальнейшем эти составы использовались в экспериментах при изучении влияния технологических режимов обработки на динамику изменения параметров шероховатости поверхности.

Из литературных данных известно [90, 206, 222, 311, 312], что наиболее значимыми элементами технологических режимов ЭИП, оказывающими наибольшее влияние на эффективность сглаживания шероховатости поверхности, являются температура электролита и продолжительность обработки. В работе [90] показано, что для одной и той же температуры электролита величина съема металла у низколегированных углеродистых сталей 10; 35 и У8А практически одинакова, а повышение температуры электролита приводит к существенному ее снижению. Согласно данным, представленным на рис. 4.38, *a*, при ЭИП стали 20 повышение температуры электролита с 60 до 90 °С приводит к снижению съема металла более чем в 2,6 раза. Известно [34, 35], что при ХП и ЭХП уровень шероховатости обработанной поверхности напрямую зависит от величины съема металла. Следовательно, снижение съема металла при повышении температуры электролита в условиях ЭИП, на первый взгляд, должно отрицательно влиять на эффективность сглаживания неровностей профиля поверхности. Учитывая важность этих элементов технологических режимов ЭИП и отсутствие достоверных экспериментальных данных об их влиянии на формирование профиля, был проведен комплексный эксперимент, в ходе которого изучалось влияние температуры электролита и уровня шероховатости исходной поверхности на динамику изменения параметров шероховатости, связанных с высотными свойствами неровностей, их формой и свойствами неровностей в направлении длины профиля. Исследование выполнялось по методике, приведенной в разделе 2.3.5, для поперечного профиля поверхности, сформированного в процессе обработки при ЭИП образцов из конструкционной углеродистой стали 10 и коррозионностойкой стали 20Х13 [271–276].

5.1.1. Исследование влияния режимов обработки на параметры шероховатости поверхности, связанные с высотными свойствами неровностей профиля

На рис. 5.2 представлена динамика изменения параметра Ra в зависимости от продолжительности обработки, температуры электролита и уровня шероховатости исходной поверхности. Характер зависимостей параметров Rz и $Rmax$ (рис. 5.3 и 5.4) подобен характеру зависимостей параметра Ra , представленному на рис. 5.2. На рис. 5.5 представлена динамика относительного сглаживания шероховатости поверхности в процессе ЭИП.

Анализ данных о динамике изменения параметров шероховатости поверхности Ra , Rz и $Rmax$ при ЭИП стали 10 показал [271, 272], что при одинаковом уровне шероховатости исходной поверхности, но при разных значениях температуры электролита изменение параметров происходит практически одинаково (рис. 5.2 *а; б*, 5.3 *а; б* и 5.4 *а; б*). Кроме того, из данных, представленных на рис. 5.5 *а; б*, следует, что при ЭИП стали 10 повышение температуры электролита с 65 до 85 °С, несмотря на существенное снижение величины съема металла, не оказывает заметного влияния на эффективность сглаживания неровностей профиля поверхности. Выявленные закономерности следует учитывать при обработке высокоточных деталей, поскольку ЭИП при высокой температуре электролита (свыше 80 °С) позволяет обеспечить заданную шероховатость поверхности при значительно меньшем съеме металла, что повышает точность обработки.

Немаловажным фактом является то, что при ЭИП стали 10 в течение 5–7 мин вне зависимости от уровня шероховатости исходной поверхности и температуры электролита в исследованных диапазонах значений обеспечивается достижение практически одинакового уровня параметров шероховатости поверхности Ra 0,10–0,17 мкм (рис. 5.2 *а; б*), Rz 0,60–0,99 мкм (рис. 5.3 *а; б*), $Rmax$ 0,74–1,31 мкм (рис. 5.4 *а; б*) и относительного сглаживания шероховатости $\Delta Ra = 85$ –89 % (рис. 5.5 *а; б*). Следовательно, при ЭИП неотвественных деталей уровень шероховатости исходной поверхности заготовки можно повысить, что позволит снизить стоимость ее предварительной механической обработки и себестоимость изготовления

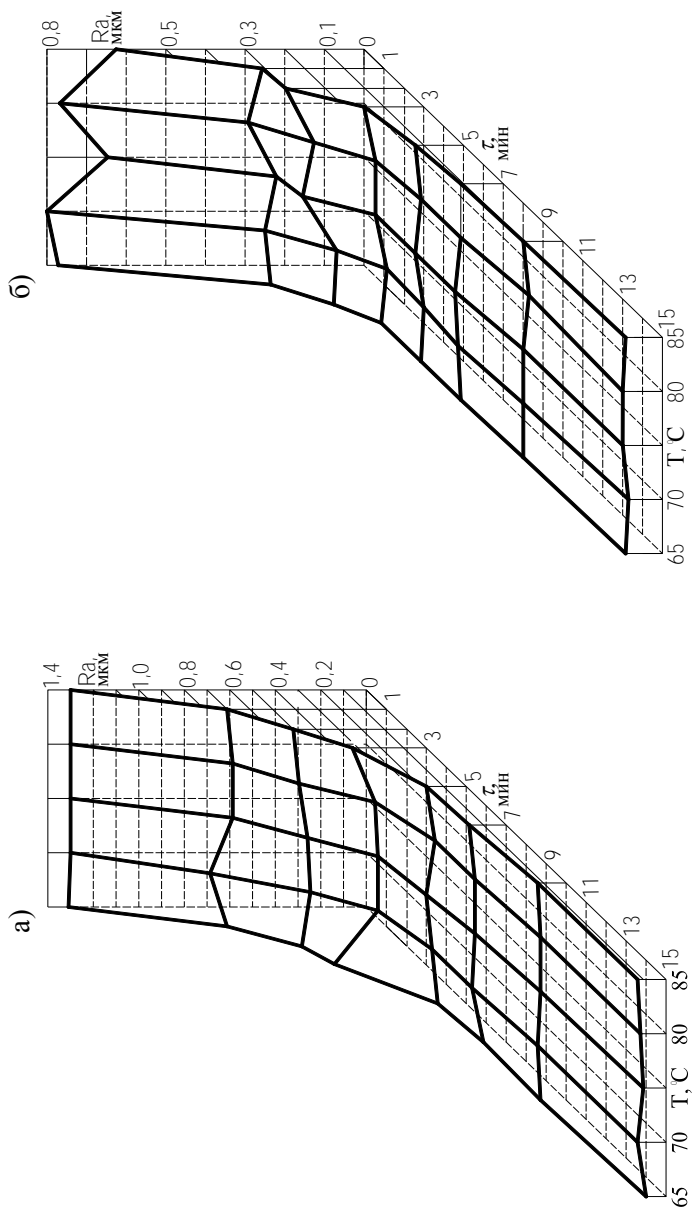


Рис. 5.2. Динамика изменения параметра Ra при ЭИП сталей 10 и 20Х13

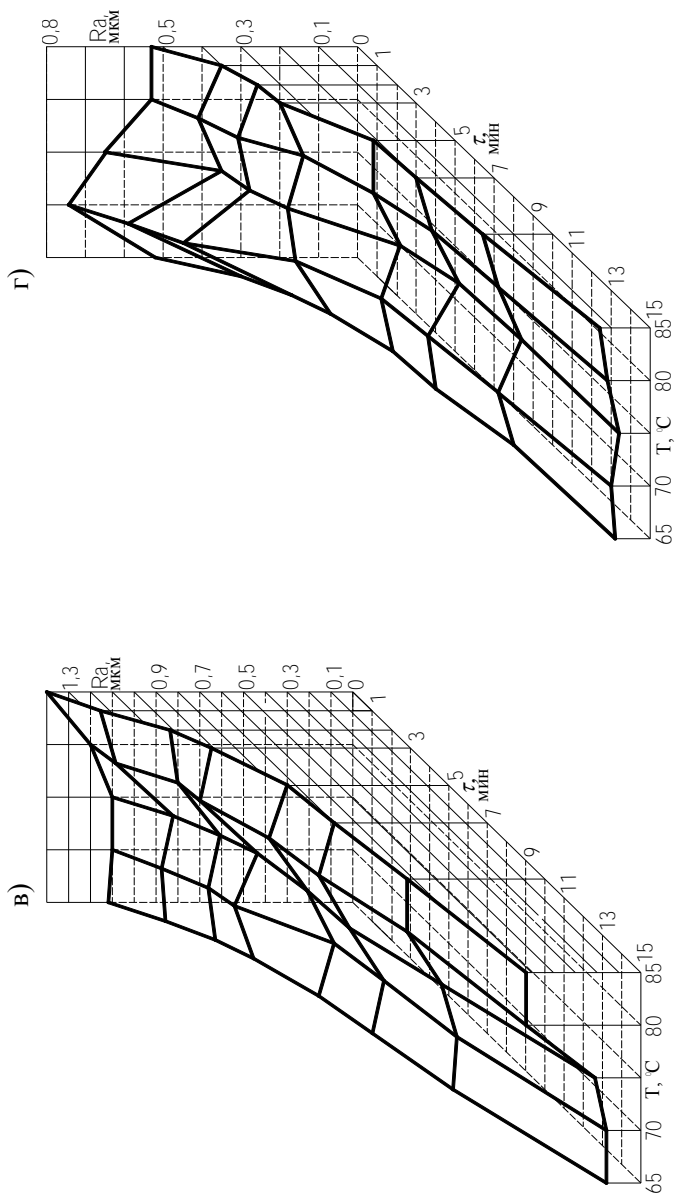


Рис 5.2. Динамика изменения параметра Ra при ЭИП сталей 10 и 20X13 (окончание)
 а – сталь 10; $Ra_{\text{нач}} 1,25-1,30$ μm ; б – сталь 10; $Ra_{\text{нач}} 0,63-0,80$ μm ;
 в – сталь 20X13; $Ra_{\text{нач}} 1,10-1,40$ μm ; г – сталь 20X13; $Ra_{\text{нач}} 0,51-0,73$ μm

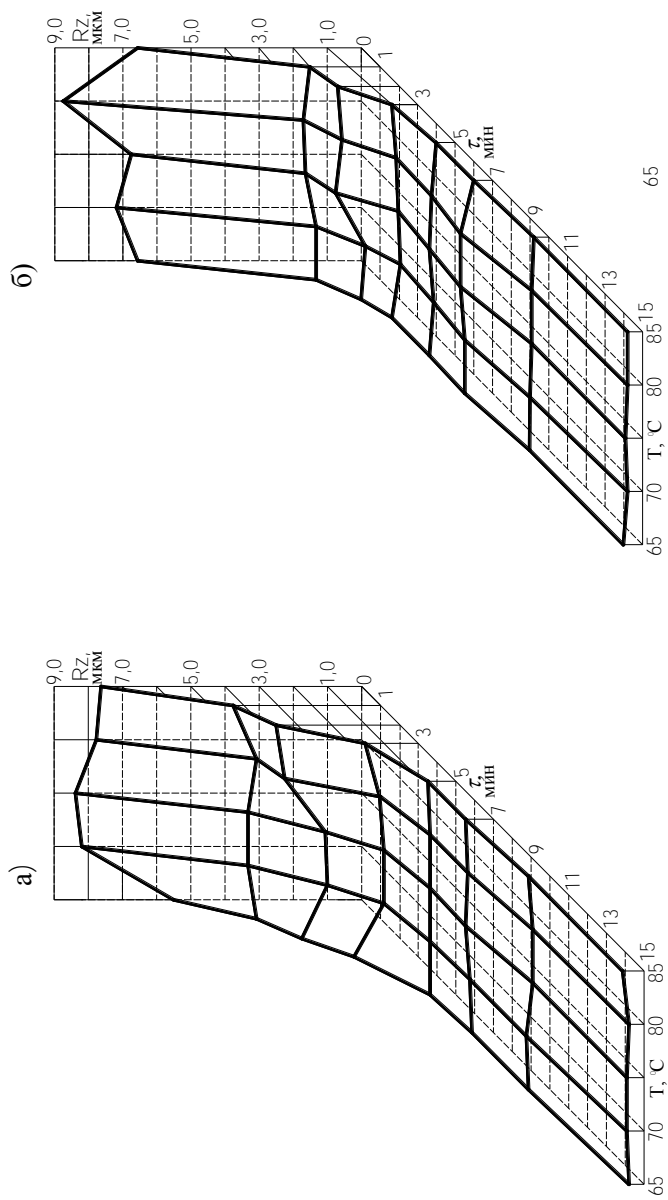


Рис. 5.3. Динамика изменения параметра Rz при ЭИП сталей 10 и 20Х13

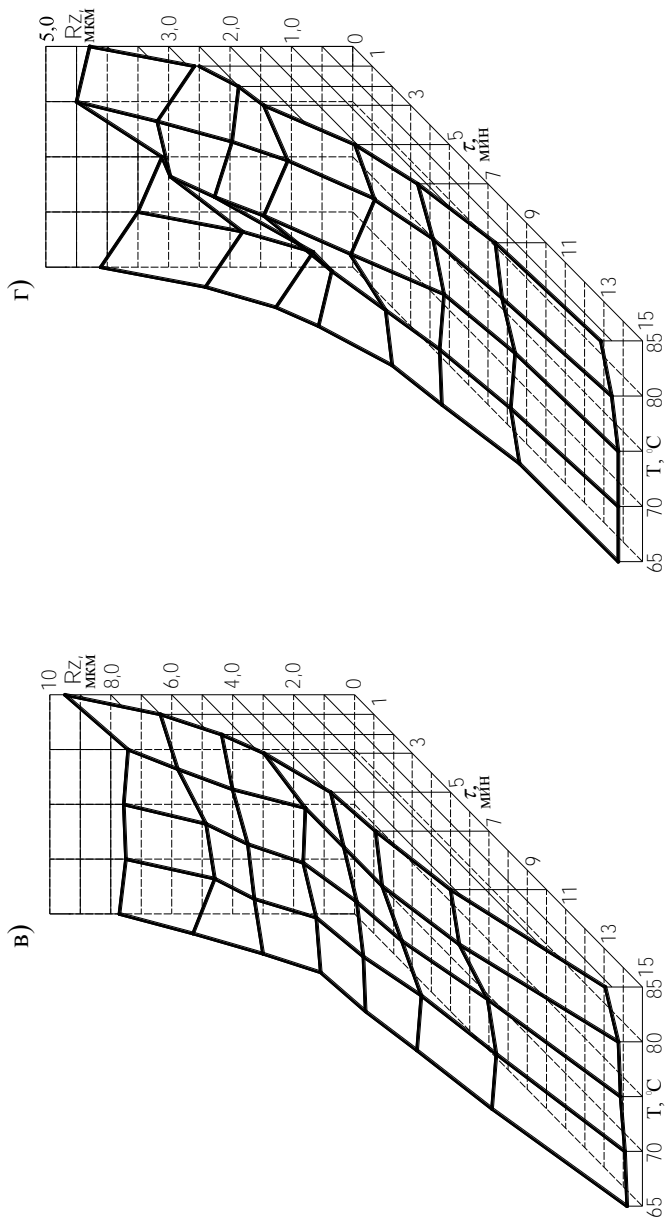


Рис 5.3. Динамика изменения параметра Rz при ЭИП сталей 10 и 20X13 (окончание)

а – сталь 10; $R_{нач} 1,25-1,30$ мкм; б – сталь 10; $R_{нач} 0,63-0,80$ мкм;
 в – сталь 20X13; $R_{нач} 1,10-1,40$ мкм; г – сталь 20X13; $R_{нач} 0,51-0,73$ мкм

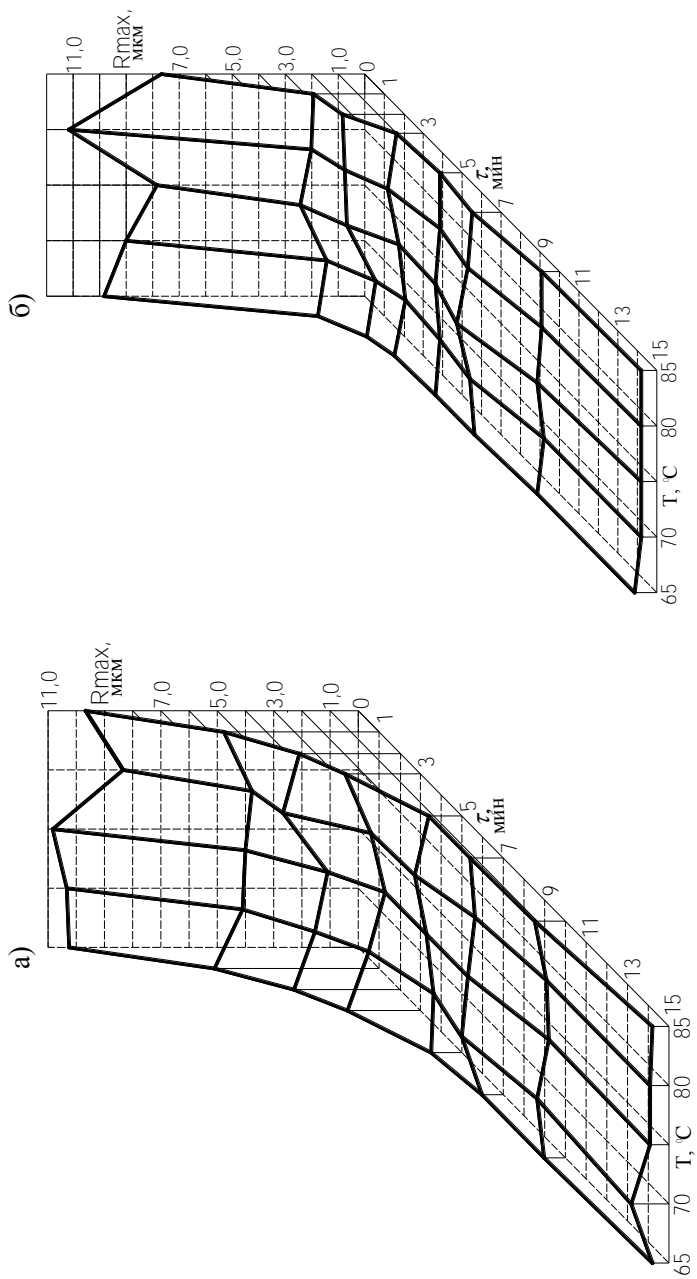


Рис. 5.4. Динамика изменения параметра R_{max} при ЭИП сталей 10 и 20Х13

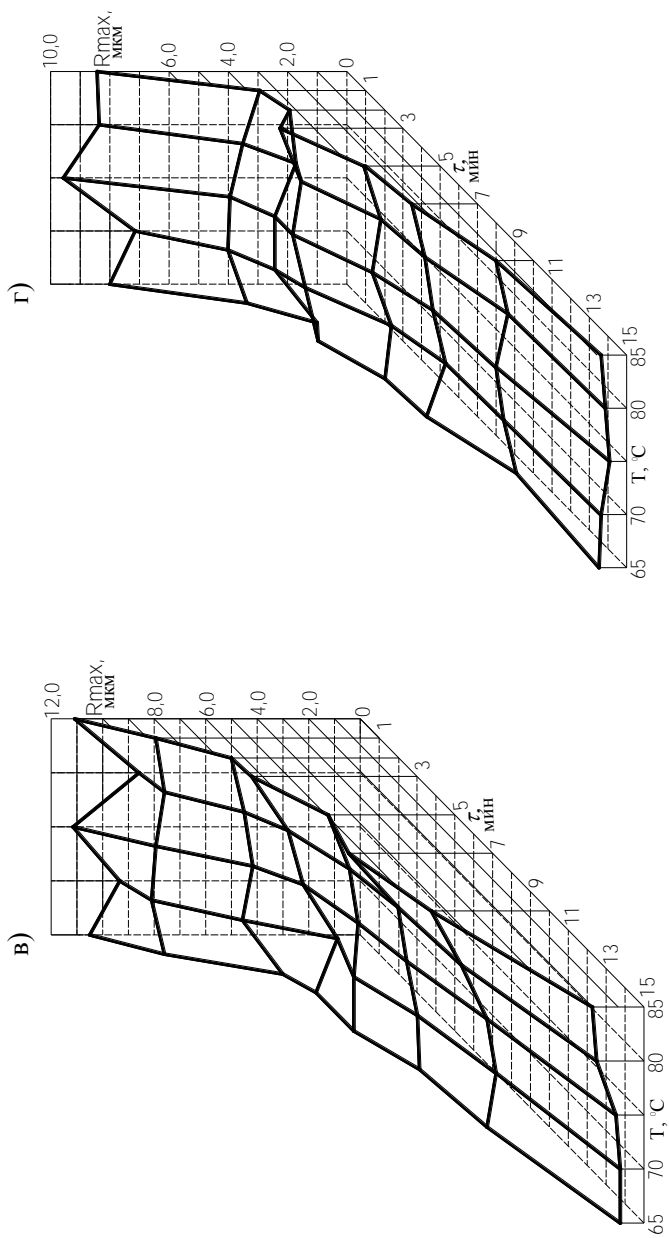


Рис. 5.4. Динамика изменения параметра R_{max} при ЭИП стальной 10 и 20Х13 (окончание)
 а – сталь 10; $R_{нач}$ 1,25–1,30 мкм; б – сталь 10; $R_{нач}$ 0,63–0,80 мкм;
 в – сталь 20Х13; $R_{нач}$ 1,10–1,40 мкм; г – сталь 20Х13; $R_{нач}$ 0,51–0,73 мкм

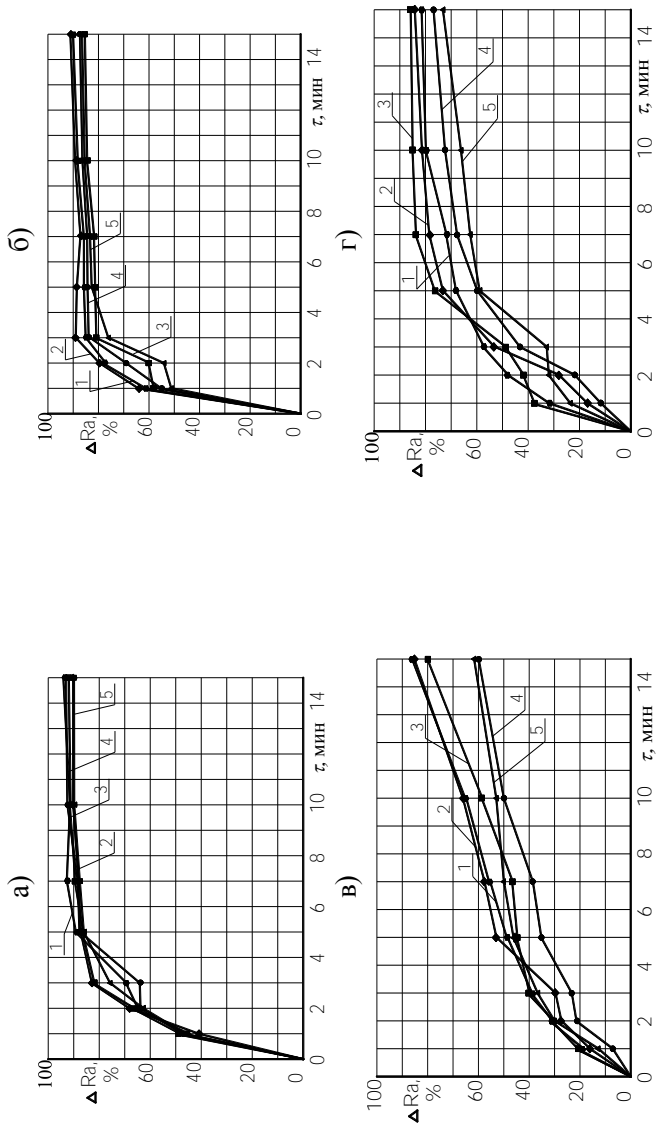


Рис. 5.5. Относительное сглаживание шероховатости поверхности при ЭИП сталей 10 и 20X13:

а – сталь 10; $Ra_{нач} 1,25-1,30$ мкм; б – сталь 10; $Ra_{нач} 0,63-0,80$ мкм;
 в – сталь 20X13; $Ra_{нач} 1,10-1,40$ мкм; г – сталь 20X13; $Ra_{нач} 0,51-0,73$ мкм;

Температура электролита:

1 – $T_{эл}=65$ °C; 2 – $T_{эл}=70$ °C; 3 – $T_{эл}=75$ °C; 4 – $T_{эл}=80$ °C; 5 – $T_{эл}=85$ °C

детали в целом при обеспечении заданной шероховатости поверхности. Следует отметить, что увеличение продолжительности обработки свыше 7 мин нецелесообразно, поскольку дальнейшее снижение параметров Ra , Rz и $Rmax$ и повышение относительного сглаживания шероховатости ΔRa относительно достигнутых уровней незначительно.

Из данных, представленных на рис. 5.2 в; з, 5.3 в; з и 5.4 в; з, следует, что при ЭИП коррозионнотойкой стали 20X13 на сглаживание неровностей профиля значительное влияние оказывает температура электролита. При этом, чем выше уровень шероховатости исходной поверхности, тем заметнее влияние температуры электролита (рис. 5.5 в; з) [273]. Так же, как и при обработке стали 10, при ЭИП стали 20X13 зависимости параметров шероховатости Ra , Rz и $Rmax$ от продолжительности обработки и температуры электролита подобны, но имеют более выраженный пологий характер. Пологий характер зависимостей можно объяснить значительно меньшим съемом металла, который при ЭИП стали 20X13 более чем в 6,5 раза ниже по сравнению с обработкой конструкционных углеродистых сталей (рис. 4.14). Анализ полученных данных показал, что при назначении продолжительности ЭИП стали 20X13 и температуры электролита следует учитывать уровень шероховатости исходной поверхности. Так, для обеспечения шероховатости Ra 0,10–0,15 мкм и относительного сглаживания $\Delta Ra=75–85$ % обработку следует проводить в течение от 7 до 15 мин при температуре электролита от 65 до 80 °С и уровне шероховатости исходной поверхности менее Ra 1,10–1,40 мкм. Увеличение продолжительности обработки свыше 15 мин нецелесообразно. Для повышения производительности обработки коррозионнотойких сталей при обеспечении заданной шероховатости поверхности ЭИП следует проводить в двухкомпонентном водном растворе, содержащем сульфат аммония и лимонную кислоту [317]. В этом случае по критерию «продолжительность обработки–относительное сглаживание шероховатости поверхности» эффективность сглаживания неровностей профиля поверхности существенно выше – относительное сглаживание шероховатости $\Delta Ra=76–88$ % достигается за 5–10 мин обработки (рис. 4.16).

Таким образом, установленный характер зависимостей параметров шероховатости Ra , Rz и $Rmax$, связанных с высотными свойствами неровностей профиля, от продолжительности обработки,

температуры электролита и уровня шероховатости исходной поверхности в исследованных диапазонах значений ($\tau = 1-15$ мин, $T_{эл} = 65-85$ °С и $Ra^{нач} = 0,51-1,40$ мкм) позволяет выделить три периода в процессе сглаживания неровностей в условиях ЭИП [271, 274]:

1. Период интенсивного сглаживания неровностей профиля продолжительностью до 1 и 2–3 мин при обработке соответственно конструкционных углеродистых и коррозионностойких сталей, который характеризуется резким снижением значений параметров шероховатости поверхности;

2. Период прогнозируемого сглаживания неровностей продолжительностью от 1 до 5–7 мин для конструкционных углеродистых сталей и от 2–3 до 10–15 мин для коррозионностойких сталей, в конце которого параметры шероховатости стремятся к минимально возможным значениям;

3. Период постоянной шероховатости поверхности, который наступает при обработке конструкционных углеродистых сталей свыше 7 мин и коррозионностойких сталей свыше 15 мин. Это период, в течение которого происходит прогнозируемое изменение размеров детали при незначительном дополнительном снижении параметров шероховатости.

5.1.2. Математическое моделирование параметров шероховатости поверхности Ra , Rz и $Rmax$ при электроимпульсном полировании низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей

Обработка результатов исследования динамики изменения параметров шероховатости поверхности Ra , Rz и $Rmax$ в зависимости от продолжительности обработки и температуры электролита показала, что математическую модель для описания этих параметров при ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей в течение соответственно до 7 и 10 мин можно представить в виде [271, 272, 274]

$$P^{кон} = P^{нач} \cdot e^{-k\tau},$$

где $P^{кон}$ – значение заданного параметра шероховатости поверхности Ra , Rz или $Rmax$, мкм; $P^{нач}$ – значение параметра шероховато-

сти исходной поверхности, мкм; k – коэффициент, зависящий от вида обрабатываемого материала и температуры электролита, мин^{-1} ; τ – продолжительность обработки, мин.

Данная модель позволяет прогнозировать изменение параметров Ra , Rz или $Rmax$ в зависимости от вида обрабатываемого материала, режимов обработки и уровня шероховатости исходной поверхности, а также решать обратную задачу – исходя из известных значений $\Pi^{\text{нач}}$ и $\Pi^{\text{кон}}$, рассчитать оптимальную продолжительность обработки по формуле

$$\tau = -\frac{1}{k} \ln \frac{\Pi^{\text{кон}}}{\Pi^{\text{нач}}}.$$

На основании полученных данных о зависимости параметров Ra , Rz и $Rmax$ от продолжительности обработки и температуры электролита и данных о величине съема металла в зависимости от температуры электролита, приведенных в работах [90, 233], был разработан алгоритм назначения режимов обработки при ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей, представленный на рис. 5.6, и написана компьютерная программа «Электроимпульсное полирование» [326].

Особенностью программы «Электроимпульсное полирование» является то, что в зависимости от задач, поставленных перед операцией ЭИП, пользователь может, варьируя технологическими режимами обработки, с достаточно высокой точностью оценить уровень параметров шероховатости Ra , Rz или $Rmax$ поверхности и величину съема металла на сторону после ЭИП или по известным данным о шероховатости поверхности заготовки и готовой детали рассчитать необходимую продолжительность обработки. Для конкретных режимов обработки пользователь может вывести на экран монитора изображение поверхности, обработанной на данных режимах, или в графическом виде – зависимости параметров Ra , Rz или $Rmax$ от продолжительности обработки. Часть рабочих окон программы «Электроимпульсное полирование» представлена на рис. 5.7. С помощью программы, интегрированной в САПР ТП, появляется возможность автоматизации процесса проектирования технологической операции ЭИП.

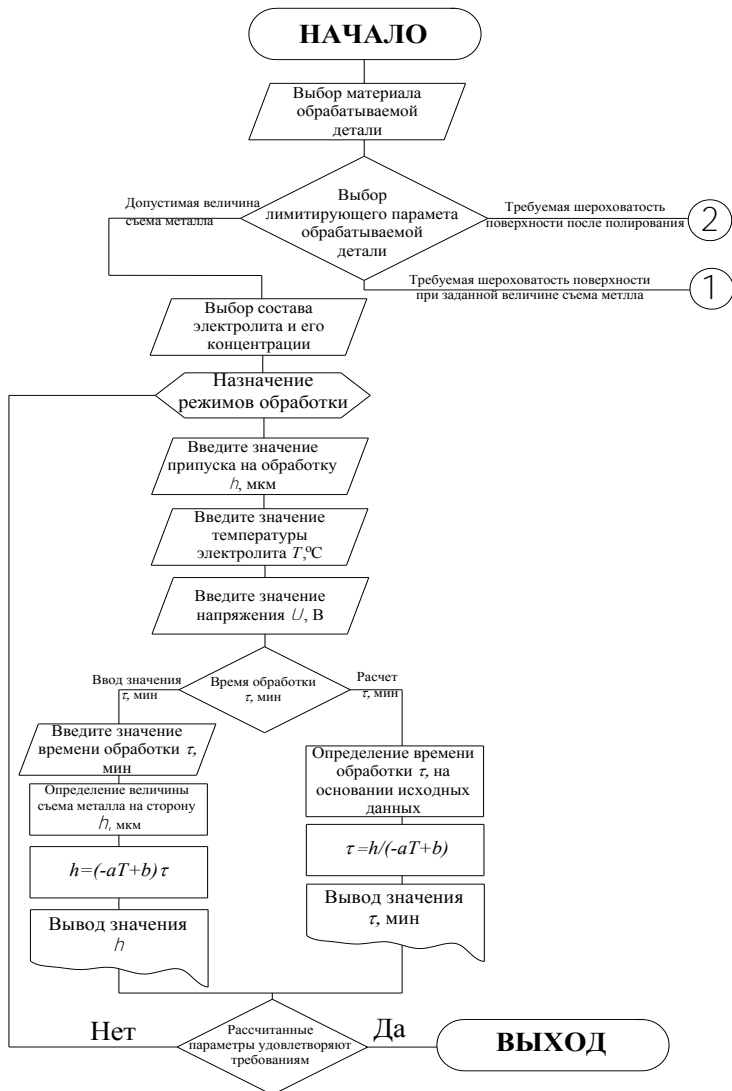


Рис. 5.6. Алгоритм назначения режимов ЭИП

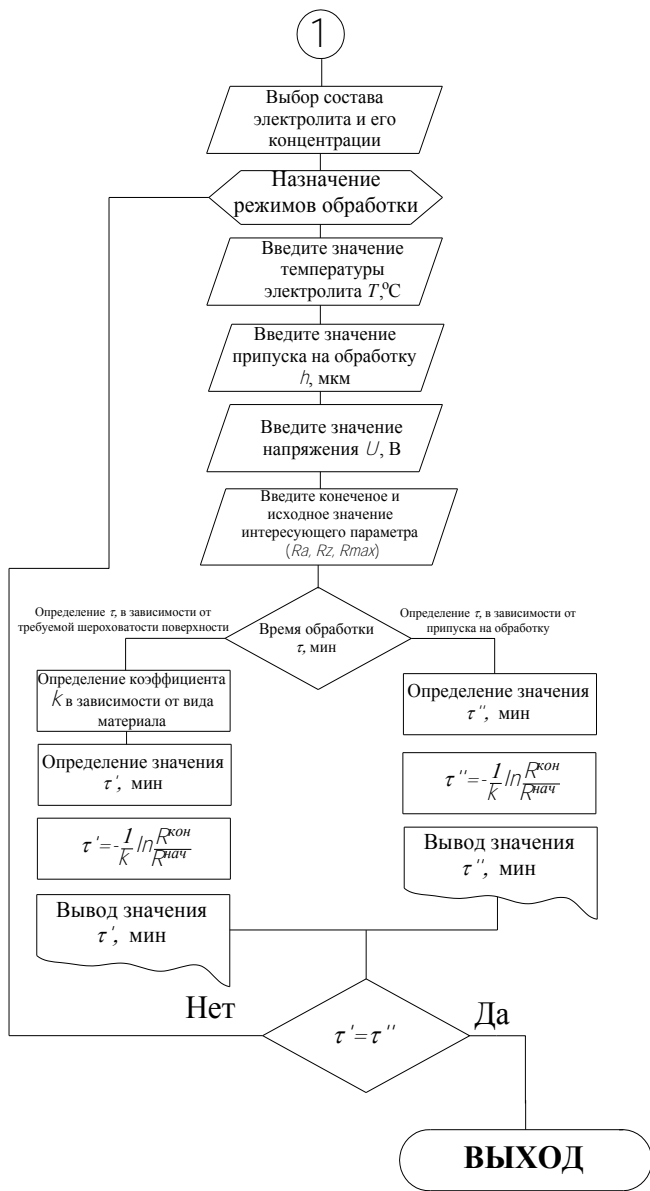


Рис. 5.6. Алгоритм назначения режимов ЭИП (продолжение)



Рис. 5.6. Алгоритм назначения режимов ЭИП (окончание)

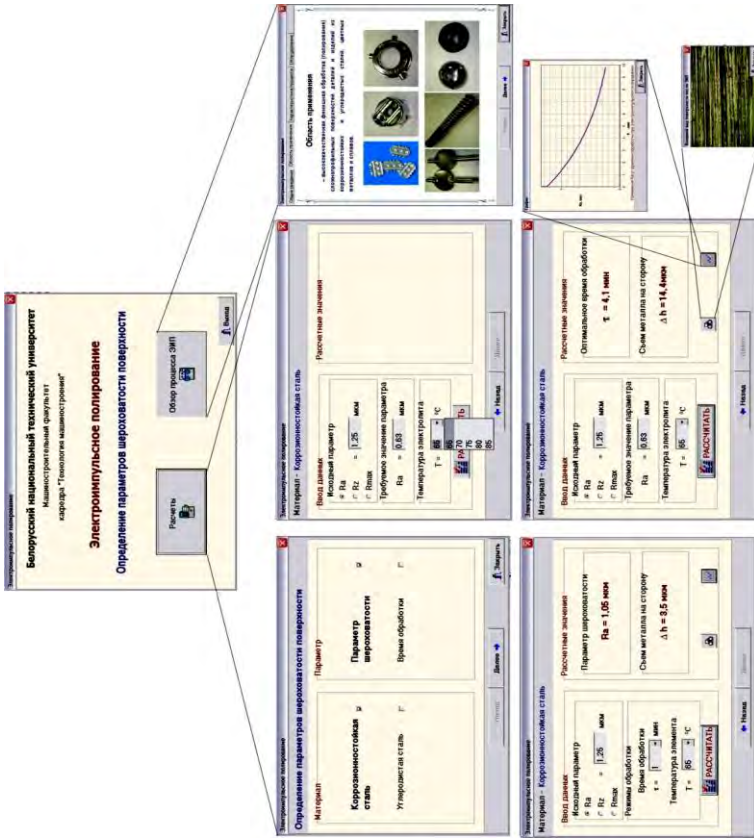


Рис. 5.7. Рабочие окна программы «Электроимпульсное полирование»

На рис. 5.8 в качестве примера представлены расчетные и экспериментальные зависимости параметра Ra от продолжительности обработки при ЭИП сталей 10 и 20X13 при температуре электролита 85 °С, которые подтверждают адекватность предложенной математической модели.

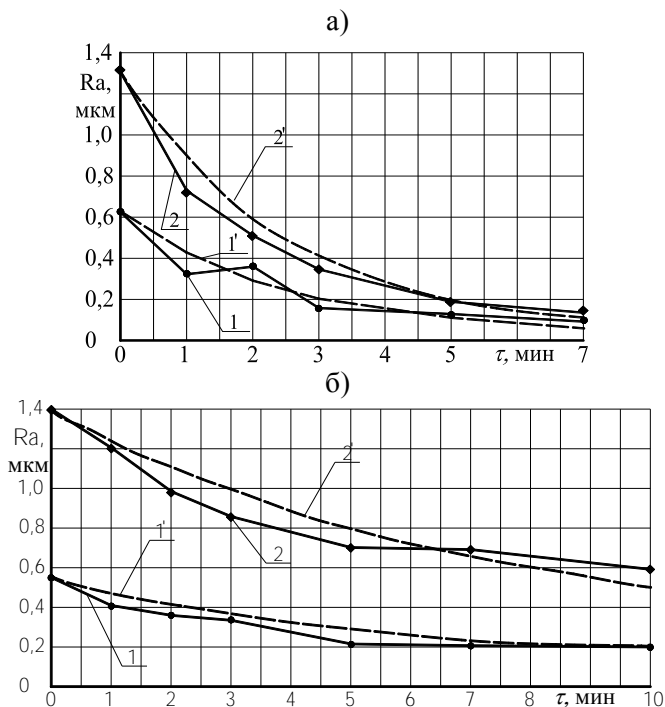


Рис. 5.8. Теоретические и экспериментальные зависимости параметра Ra от продолжительности ЭИП для сталей 10 (а) и 20X13 (б):
1; 2 – экспериментальные данные; 1'; 2' – теоретические зависимости

Следует отметить, что, несмотря на установленные закономерности, параметры шероховатости поверхности, связанные с высотными свойствами неровностей профиля, не дают никакой информации о динамике изменения формы неровностей и не могут в полной мере служить основой для изучения механизма и основных закономерностей формирования профиля поверхности в условиях ЭИП.

5.1.3. Исследование влияния режимов обработки на параметры шероховатости поверхности, связанные с формой неровностей и их свойствами в направлении длины профиля

В отличие от параметров шероховатости, связанных с высотными свойствами неровностей профиля, параметры шероховатости поверхности, связанные с формой неровностей и их свойствами в направлении длины профиля, могут быть весьма информативными при изучении механизма формирования профиля в условиях ЭИП. В результате анализа комплекса параметров шероховатости поверхности можно получить полную информацию о структуре сформированной шероховатости, на основании которой можно с полной уверенностью судить о механизме формирования топографии при ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля.

Изучение влияния ЭИП на динамику изменения параметров шероховатости, связанных с формой неровностей и их свойствами в направлении длины профиля, проводилось по методике, приведенной в разделе 2.3.5. На рис. 5.9 представлены данные о динамике среднего шага неровностей профиля S_m в зависимости от продолжительности обработки, температуры электролита и уровня шероховатости исходной поверхности при ЭИП образцов из сталей 10 и 20Х13 [271–273, 275, 276]. Видно, что эмпирические кривые для обеих марок сталей можно с достаточной точностью аппроксимировать линейными функциями. Из данных, представленных на рис. 5.9, следует, что скорость сглаживания неровностей профиля, выражающаяся в динамике роста среднего шага неровностей S_m , выше для поверхностей с более низкой исходной шероховатостью. При этом влияние температуры электролита на динамику параметра S_m несущественно в случае ЭИП низколегированной углеродистой стали с одинаковым уровнем шероховатости исходной поверхности, в то время как при обработке коррозионностойкой стали оно более выражено.

Необходимо отметить, что при расчете значений параметра S_m использованный нами профилограф-профилометр Talysurf-5 (Rank Taylor Hobson, Англия) автоматически определяет необходимую длину оценки, которая может включать одну или несколько базовых длин [251, 269]. Поэтому в том случае, когда средний шаг неровностей профиля S_m превышал базовую длину, его расчет произ-

водился на длине оценки, превышавшей базовую длину. Благодаря этой особенности прибора, удалось определить средний шаг неровностей профиля, значительно превышавший базовую длину (рис. 5.9).

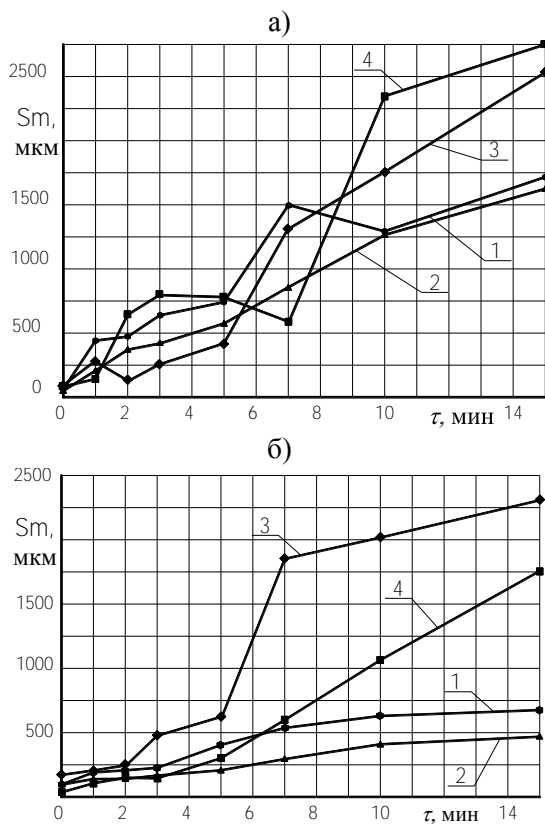


Рис. 5.9. Зависимость среднего шага неровностей Sm от продолжительности обработки при ЭИП сталей 10 и 20X13:

а – сталь 10:

1 – $Ra^{нач} 1,30$ мкм, $T_{эл}=65$ °C; 2 – $Ra^{нач} 1,30$ мкм, $T_{эл}=85$ °C;

3 – $Ra^{нач} 0,78$ мкм, $T_{эл}=65$ °C; 4 – $Ra^{нач} 0,63$ мкм, $T_{эл}=85$ °C;

б – сталь 20X13:

1 – $Ra^{нач} 1,12$ мкм, $T_{эл}=65$ °C; 2 – $Ra^{нач} 1,40$ мкм, $T_{эл}=85$ °C;

3 – $Ra^{нач} 0,52$ мкм, $T_{эл}=65$ °C; 4 – $Ra^{нач} 0,53$ мкм, $T_{эл}=85$ °C

Этот факт в совокупности с линейным характером изменения параметра Sm , динамикой снижения количества выступов профиля

HSC (табл. 5.1) и пропорциональным уменьшением значений параметров R_p и R_{max} (табл. 5.2) указывают на возможное равномерное растворение неровностей профиля, включая местные выступы, расположенные на выступах и во впадинах профиля поверхности.

Таблица 5.1 – Количество выступов профиля *HSC* в зависимости от продолжительности ЭИП и шероховатости исходной поверхности

Марка стали и Ra исходной поверхности	Количество выступов профиля <i>HSC</i>							
	Продолжительность ЭИП, мин							
	0	1	2	3	5	7	10	15
Сталь 10 $Ra^{нач} 0,65$ мкм	111	17	7	6	–	5	2	2
Сталь 10 $Ra^{нач} 1,30$ мкм	86	16	8	6	2	3	2	2
Сталь 20X13 $Ra^{нач} 0,65$ мкм	57	56	22	25	2	2	1	1
Сталь 20X13 $Ra^{нач} 1,10$ мкм	67	60	28	31	13	10	8	8

Таблица 5.2 – Параметры шероховатости R_p и R_{max} в зависимости от продолжительности ЭИП и шероховатости исходной поверхности

Марка стали и Ra исходной поверхности	Параметры R_p (в числителе) и R_{max} (в знаменателе), мкм							
	Продолжительность ЭИП, мин							
	0	1	2	3	5	7	10	15
Сталь 10 $Ra^{нач} 0,65$ мкм	$\frac{3,50}{7,80}$	$\frac{1,80}{3,20}$	$\frac{1,40}{3,20}$	$\frac{0,67}{0,94}$	$\frac{0,68}{0,98}$	$\frac{1,39}{1,88}$	$\frac{0,67}{0,90}$	$\frac{0,33}{0,61}$
Сталь 10 $Ra^{нач} 1,30$ мкм	$\frac{6,70}{10,80}$	$\frac{2,30}{4,80}$	$\frac{1,20}{2,60}$	$\frac{0,70}{1,26}$	$\frac{0,69}{1,20}$	$\frac{0,79}{1,21}$	$\frac{0,51}{0,61}$	$\frac{0,49}{0,68}$
Сталь 20X13 $Ra^{нач} 0,65$ мкм	$\frac{6,10}{9,60}$	$\frac{1,30}{4,50}$	$\frac{1,60}{3,70}$	$\frac{1,10}{3,70}$	$\frac{0,69}{2,30}$	$\frac{0,39}{1,48}$	$\frac{0,66}{1,30}$	$\frac{0,29}{0,61}$
Сталь 20X13 $Ra^{нач} 1,10$ мкм	$\frac{3,90}{11,10}$	$\frac{3,20}{8,70}$	$\frac{2,30}{5,70}$	$\frac{1,80}{4,40}$	$\frac{2,00}{3,80}$	$\frac{1,47}{3,37}$	$\frac{1,17}{2,45}$	$\frac{0,59}{1,07}$

В табл. 5.1 и 5.2 в качестве примера приведены данные соответственно о количестве выступов профиля *HSC* и динамике изменения параметров шероховатости R_p и R_{max} в зависимости от уровня шероховатости исходной поверхности и продолжительности обработки при температуре электролита 75 °С.

Для проверки гипотезы о равновероятном растворении в процессе ЭИП неровностей профиля поверхности, включая местные выступы, расположенные на выступах и во впадинах профиля, был проведен анализ динамики изменения параметров шероховатости, связанных с формой неровностей профиля – среднего квадратического наклона профиля Δq и средней квадратической длины волны профиля λq [273, 275, 276], которые характеризуют профиль реальной поверхности в равной мере как на выступах, так и во впадинах и рассчитываются по формулам [269]:

$$\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx} \quad \text{или} \quad \Delta q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)_i^2}, \quad (5.1)$$

$$\lambda q = 2\pi \frac{Rq}{\Delta q},$$

где l – базовая длина профиля поверхности, мкм; y – отклонение профиля, равное расстоянию между точкой профиля и средней линией профиля, мкм; dy/dx – тангенс угла наклона в точке профиля поверхности; n – количество измерений.

Физический смысл средней квадратической длины волны профиля λq становится понятным, если профиль реальной поверхности представить в виде волновой формы. Профиль, как и любой сигнал, в общем случае может быть получен в результате суммирования двух синусоидальных волн – основной волны (основной гармоники) и дополнительной волны (второстепенной гармоники). При этом основная гармоника представляет собой основные неровности профиля поверхности, имеет меньшую частоту и определяется характером механической обработки поверхности. Второстепенная гармоника обусловлена наличием на поверхности основных неровностей местных выступов и впадин, появившихся в результате воздействия случайных факторов при механической обработке и имеющих относительно небольшие размеры. Следует отметить, что основная и второстепенная гармоники, различаясь по частоте, могут иметь одинаковую амплитуду. В качестве примера на рис. 5.10 показаны различные профили, представляющие собой композицию основной гармоники с постоянной амплитудой и частотой со второстепенной гармоникой с одинаковой частотой, но с переменной амплитудой [251].

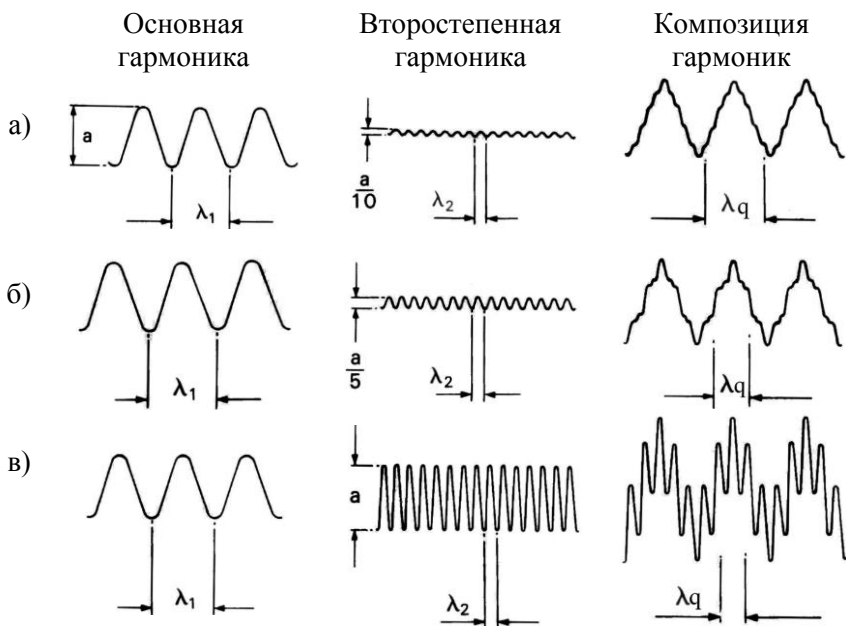


Рис. 5.10. Влияние амплитуды второстепенной гармоники на длину волны профиля

Суммирование основной гармоники с периодом λ_1 со второстепенной гармоникой с периодом λ_2 , имеющей малую амплитуду ($a/10$) (рис. 5.10, а), приводит к общему профилю с периодом λq , который лишь незначительно меньше периода λ_1 . По мере увеличения амплитуды второстепенной гармоники происходит уменьшение периода λq суммарного профиля (рис. 5.10, б) и в момент, когда амплитуды обеих гармоник оказываются равными, λq принимает минимальное значение (рис. 5.10, в). В случае анализа реального профиля поверхности параметр шероховатости λq по определению [258] характеризует среднюю квадратическую длину волны профиля. Из представленной на рис. 5.10 схемы следует, что для двух различных реальных поверхностей при одинаковых параметрах шероховатости, связанных с высотными свойствами и свойствами неровностей в направлении длины профиля, форма их выступов и впадин может существенно отличаться.

На рис. 5.11 представлена динамика параметра λq в процессе ЭИП образцов из сталей 10 и 20X13 в зависимости от продолжительности обработки и температуры электролита.

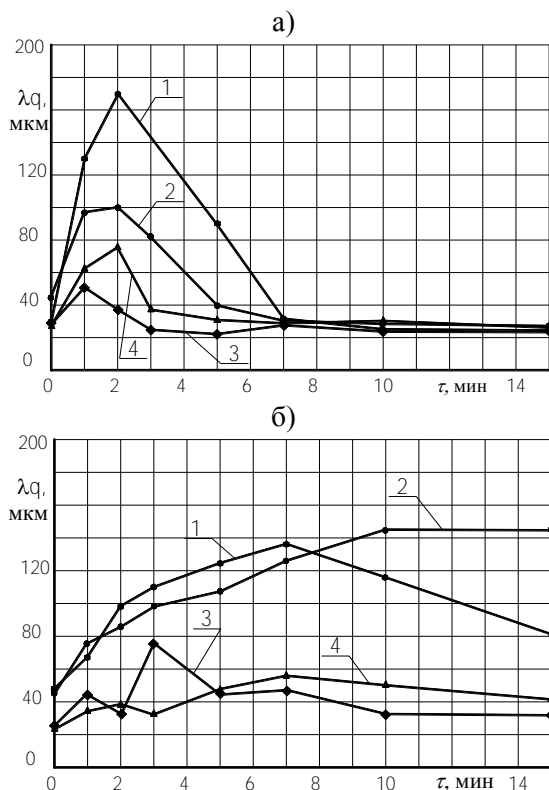


Рис. 5.11. Средняя квадратическая длина волны профиля λq в зависимости от продолжительности ЭИП и температуры электролита:

а – сталь 10:

1 – $Ra^{\text{нач}}$ 1,30 мкм, $T_{\text{эл}}=65$ °C; 2 – $Ra^{\text{нач}}$ 1,30 мкм, $T_{\text{эл}}=85$ °C;

3 – $Ra^{\text{нач}}$ 0,78 мкм, $T_{\text{эл}}=65$ °C; 4 – $Ra^{\text{нач}}$ 0,63 мкм, $T_{\text{эл}}=85$ °C;

б – сталь 20X13:

1 – $Ra^{\text{нач}}$ 1,12 мкм, $T_{\text{эл}}=65$ °C; 2 – $Ra^{\text{нач}}$ 1,40 мкм, $T_{\text{эл}}=85$ °C;

3 – $Ra^{\text{нач}}$ 0,52 мкм, $T_{\text{эл}}=65$ °C; 4 – $Ra^{\text{нач}}$ 0,53 мкм, $T_{\text{эл}}=85$ °C

Видно, что на динамику средней квадратической длины волны профиля существенное влияние оказывают продолжительность обработки, уровень шероховатости исходной поверхности и темпера-

тура электролита. Причем, чем выше исходная шероховатость и ниже температура, тем больше выражен экстремальный характер зависимости параметра шероховатости λq от продолжительности обработки.

Наблюдаемую динамику можно объяснить, опираясь на схему, представленную на рис. 5.10. В первые 2 мин обработки для стали 10 и 3–7 мин для стали 20X13 местные выступы, расположенные на профиле поверхности, вследствие своих малых размеров растворяются быстрее по сравнению с основными выступами, что вызывает уменьшение амплитуды второстепенной гармоники и соответствующее увеличение параметра λq . Последующее уменьшение λq на временном интервале от 2 до 5 мин для стали 10 и от 3 до 10 мин для стали 20X13 вызвано дальнейшим растворением основных и местных выступов с соответствующим снижением их высоты и исключением полностью растворившихся местных выступов при расчете значений параметра λq . Подтверждением этого положения служит увеличение среднего шага неровностей профиля Sm (рис. 5.9) и уменьшение количества выступов профиля HSC (табл. 5.1). Дальнейшая обработка приводит к достижению минимально возможной шероховатости, ограниченной проявившейся микроструктурой на поверхности обрабатываемого сплава [236, 286, 321]. Более выраженный экстремальный характер параметра λq при ЭИП стали 10 можно объяснить большей скоростью съема металла по сравнению с обработкой коррозионностойких сталей (рис. 4.14).

Изменение среднего квадратического наклона профиля Δq в процессе ЭИП показано на рис. 5.12. Из представленных данных следует, что на начальном этапе обработки происходит резкое уменьшение параметра Δq . Данный факт свидетельствует в пользу быстрого растворения местных выступов профиля. Полное растворение местных выступов приводит к некоторой минимальной величине Δq , определяемой углом наклона профиля оставшихся не полностью растворившихся выступов и проявившихся кристаллитов на полированной поверхности.

Таким образом, установленные технологические закономерности формирования профиля поверхности в условиях ЭИП свидетельствуют о том, что при обработке сплавов на основе железа, хрома и никеля сглаживание неровностей происходит с равной вероятностью на вершинах и во впадинах профиля. Местные выступы

профиля вследствие существенно меньших размеров по сравнению с основными выступами сглаживаются за более короткое время.

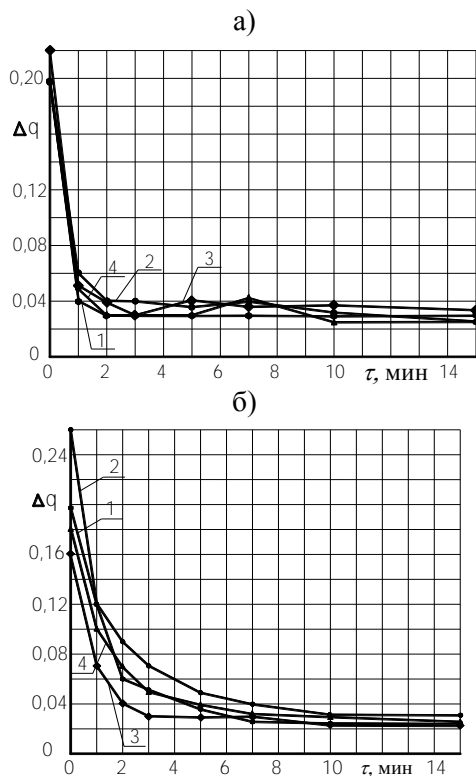


Рис. 5.12. Влияние продолжительности ЭИП и температуры электролита на средний квадратический наклон профиля поверхности Δq .

а – сталь 10:

1 – $Ra^{\text{нач}}$ 1,30 мкм, $T_{\text{эл}}=65$ °С; 2 – $Ra^{\text{нач}}$ 1,30 мкм, $T_{\text{эл}}=85$ °С;

3 – $Ra^{\text{нач}}$ 0,78 мкм, $T_{\text{эл}}=65$ °С; 4 – $Ra^{\text{нач}}$ 0,63 мкм, $T_{\text{эл}}=85$ °С;

б – сталь 20X13:

1 – $Ra^{\text{нач}}$ 1,12 мкм, $T_{\text{эл}}=65$ °С; 2 – $Ra^{\text{нач}}$ 1,40 мкм, $T_{\text{эл}}=85$ °С;

3 – $Ra^{\text{нач}}$ 0,52 мкм, $T_{\text{эл}}=65$ °С; 4 – $Ra^{\text{нач}}$ 0,53 мкм, $T_{\text{эл}}=85$ °С

5.1.4. Вероятностно-статистическая оценка профиля поверхности, сформированного в условиях электроимпульсного полирования

Закономерности формирования профиля поверхности в условиях ЭИП дополнительно изучались вероятностно-статистическим методом с использованием корреляционного преобразования профилограмм поверхности образцов из сталей 10 и 20Х13 [282, 283] по методике, приведенной в разделе 2.3.6. Шероховатость исходной поверхности образцов составляла $Ra^{\text{нач}}$ 1,30–1,40 мкм и $Ra^{\text{нач}}$ 0,53–0,63 мкм. На рис. 5.13 в качестве примера представлены профилограммы исходной поверхности образца из стали 10 и после ЭИП в течение 1; 3 и 15 мин.

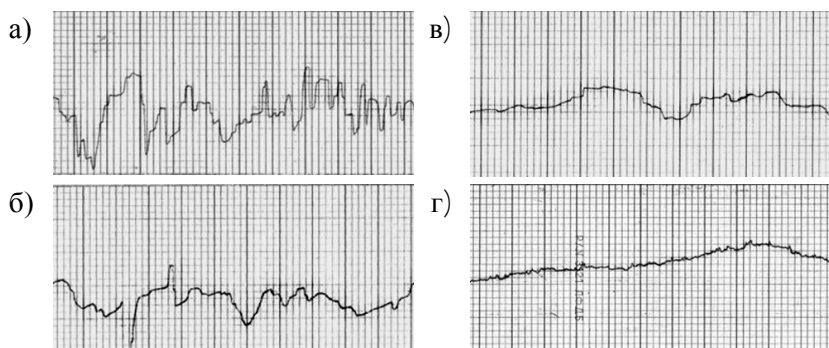


Рис. 5.13. Профилограммы поверхности образца из стали 10 при продолжительности ЭИП, мин:

a – исходная поверхность (Ra 0,63 мкм); *б* – 1; *в* – 3; *г* – 15 (ГУ x100; ВУ x5000)

В результате математической обработки для каждой профилограммы были построены коррелограмма, спектрограмма, сглаженная гистограмма и график зависимости коэффициентов корреляционной функции от продолжительности ЭИП. Расчет значений коррелограмм и спектрограмм производился соответственно по формулам (2.14) и (2.15), аппроксимация построенных коррелограмм – по (2.16). Результаты расчетов представлены в табл. 5.3.

Таблица 5.3 – Исходные данные, вид линии отсчета ординат профиля, значения параметра Ra и параметров уравнения корреляционной функции

Образец	Время ЭИП, мин	Ra измеренное, мкм	ERa , мкм	Тип приближения линии отсчета	Параметры приближения*	Параметры уравнения корреляционной функции					
						γ	β	ν	T_{β} , мкм	T_{ν} , мкм	α
Сталь 10 $Ra_{\text{неч}} 1,3$ мкм	0	1,30	0,95	-	-	0,715	0,138	0,147	499,4	266,3	0,040
	1	0,70	0,66	-	-	0,646	0,339	0,015	466,8	220,3	0,016
	2	0,49	0,38	LRL	-	0,650	0,340	0,010	609,6	260,0	0,009
	3	0,33	0,27	SPL	1e-10	0,743	0,214	0,043	582,6	208,2	0,013
	5	0,17	0,18	SPL	1e-7	0,636	0,117	0,247	462,8	219,8	0,066
	7	0,16	0,16	SPL	5e-9	0,568	0,351	0,081	451,0	241,0	0,034
	10	0,14	0,14	FTW	3	0,540	0,440	0,020	531,2	283,1	0,037
	15	0,13	0,12	SPL	3e-9	0,481	0,456	0,093	781,7	305,7	0,037
Сталь 10 $Ra_{\text{неч}} 0,63$ мкм	0	0,63	0,59	LRL	-	0,730	0,118	0,152	345,7	72,84	0,088
	1	0,31	0,29	SPL	1e-9	0,750	0,143	0,107	438,3	161,8	0,047
	2	0,33	0,28	-	-	0,370	0,550	0,040	940,0	493,0	0,009
	3	0,15	0,18	SPL	1e-7	0,750	0,133	0,117	307,0	158,5	0,010
	5	0,12	0,13	SPL	5e-9	0,492	0,226	0,282	544,3	284,9	0,043
	7	0,11	0,11	SPL	5e-8	0,800	0,070	0,130	408,0	268,0	0,074
	10	0,10	0,10	FTW	2	0,310	0,588	0,070	527,4	308,6	0,043
	15	0,09	0,09	FTW	2	0,621	0,289	0,091	478,0	335,0	0,088
Сталь 20X13 $Ra_{\text{неч}} 1,4$ мкм	0	1,40	1,25	LRL	-	0,78	0,17	0,05	193,0	143,0	0,056
	1	1,19	1,07	LRL	-	0,74	0,11	0,15	515,0	192,1	0,044
	2	0,97	0,91	LRL	-	0,69	0,15	0,16	549,3	203,0	0,020
	3	0,83	0,83	SPL	2e-9	0,66	0,22	0,12	599,0	159,0	0,038
	5	0,71	0,72	SPL	3e-8	0,54	0,12	0,34	312,0	212,0	0,040
	7	0,68	0,68	SPL	5e-10	0,45	0,47	0,08	590,0	315,8	0,028
	10	0,61	0,61	SPL	6e-10	0,49	0,22	0,29	622,0	430,8	0,027
	15	0,53	0,55	FTW	3	0,59	0,23	0,18	847,0	371,2	0,017
Сталь 20X13 $Ra_{\text{неч}} 0,53$ мкм	0	0,53	0,53	LRL	-	0,850	0,070	0,080	294,3	82,9	0,108
	1	0,40	0,46	SPL	1e-8	0,890	0,033	0,077	519,0	178,0	0,138
	2	0,36	0,38	SPL	6e-8	0,787	0,095	0,118	324,9	169,9	0,079
	3	0,35	0,36	LRL	-	0,731	0,138	0,131	408,4	313,1	0,039
	5	0,21	0,23	SPL	3e-9	0,662	0,219	0,071	333,6	248,6	0,036
	7	0,20	0,19	FTW	2	0,646	0,135	0,219	421,9	301,8	0,031
	10	0,18	0,18	SPL	1e-7	0,600	0,220	0,180	217,8	181,0	0,061
	15	0,13	0,13	SPL	9e-9	0,640	0,230	0,130	449,8	340,1	0,041

Примечание: * – для типа приближения SPL приведено значение параметра сглаживания, для FTW – количество членов в ряду Фурье.

На рис. 5.14 в качестве примера представлены коррелограммы и спектрограммы поверхности образцов из сталей 10 и 20X13 после ЭИП в течение 15 мин.

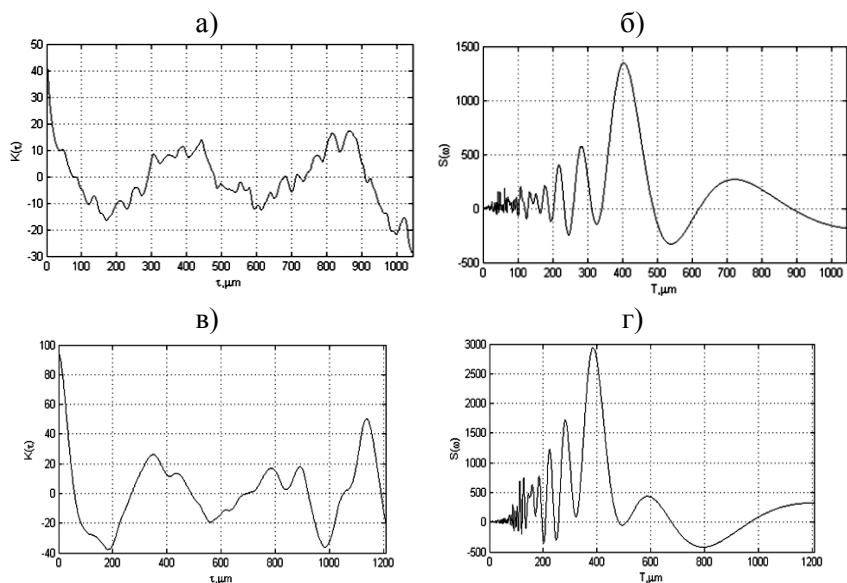


Рис. 5.14. Коррелограммы (а; в) и спектрограммы (б; г) поверхности образцов: а; б – сталь 10 (Ra 0,09 мкм); в; г – сталь 20X13 (Ra 0,13 мкм)

Анализ полученных данных показал, что в структуре шероховатости исходной поверхности значительное место занимают высокочастотные случайные и систематические неровности с периодом до 200 мкм (рис. 5.15). Сравнительный анализ спектрограмм показал, что амплитуды неровностей вне зависимости от их периода убывают по мере увеличения продолжительности обработки. Рост коэффициента β (табл. 5.3) свидетельствует о том, что во всех случаях наблюдается увеличение шагов систематических неровностей и повышение влияния низкочастотных неровностей на совокупную шероховатость поверхности. После 10 мин ЭИП происходит выделение одной или двух преобладающих низкочастотных гармоник с периодами от 180 до 600 мкм. Суммарный вклад этих гармоник в величину среднего квадратического отклонения профиля поверхно-

сти достигает 69 %. Неровности с мелким шагом и малой амплитудой постепенно уменьшаются и после 5–15 мин обработки практически исчезают из структуры шероховатости, что заметно при сравнении спектрограмм профиля, представленных на рис. 5.14б; з и 5.15. Данное изменение структуры неровностей может быть объяснено равновероятным съемом металла со всего профиля поверхности в процессе ЭИП.

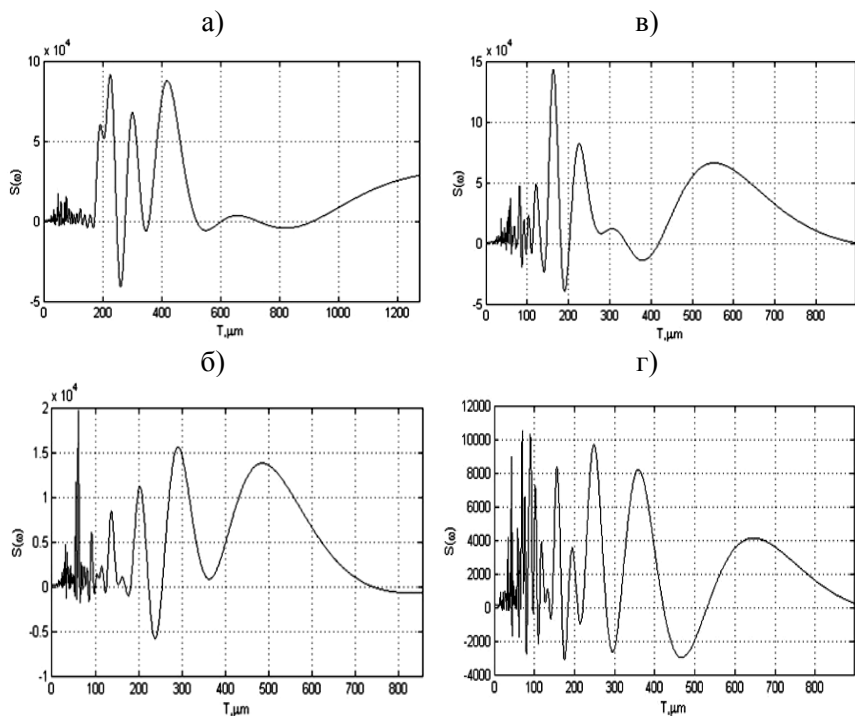


Рис. 5.15. Спектрограммы исходной поверхности образцов из стали 10 (а; б) и стали 20Х13 (в; г) при $R_{\text{э}}^{\text{нач}}$, мкм: а – 1,30; б – 0,63; в – 1,40; г – 0,53

Сравнительный анализ сглаженных гистограмм показал, что закон распределения, близкий к нормальному, характерен только для исходных шлифованных поверхностей. В остальных случаях наблюдается либо асимметрия кривой, либо многовершинность, что является признаками присутствия в профиле полированной поверх-

ности систематической компоненты [280]. Данный факт объясняется тем, что исходные поверхности получены шлифованием – методом, который придает профилю значительную случайность [278], а также снижением влияния случайной составляющей на структуру шероховатости поверхности в процессе ЭИП. При увеличении продолжительности обработки до 5–10 мин происходит плавное снижение уровня случайной составляющей профиля, характеризующееся уменьшением коэффициента случайности профиля γ (табл. 5.3). Профиль становится более однородным и периодичным. На временном интервале от 10 до 15 мин наблюдается рост уровня случайной составляющей профиля и значительное замедление темпа снижения шероховатости. Последний факт можно объяснить проявлением микроструктуры на полированной поверхности образцов.

Анализ зависимости коэффициента α от продолжительности обработки (табл. 5.3) показал, что за первую минуту обработки при ЭИП стали 10 с $Ra^{нач}$ 0,63 и 1,30 мкм и стали 20X13 с $Ra^{нач}$ 0,53 и 1,40 мкм его значение снижается в среднем соответственно на 52; 60; 56 и 29 %. Увеличение времени ЭИП приводит к уменьшению достигнутого уровня коэффициента α на временных интервалах 1–3 мин для стали 10 и 1–7 мин для стали 20X13 с $Ra^{нач}$ 0,53 мкм. Дальнейшая обработка приводит к росту коэффициента α . Для стали 20X13 с $Ra^{нач}$ 1,40 мкм снижение коэффициента α происходит во всем исследованном интервале продолжительности обработки. Следовательно, в процессе ЭИП случайные неровности, имеющие небольшую высоту, сглаживаются в той же мере, как и систематические. Форма неровностей становится более плавной, а шаг между неровностями увеличивается. Это происходит до тех пор, пока доминирующее влияние на структуру случайных неровностей не начинает оказывать микроструктура, проявляющаяся на полированной поверхности.

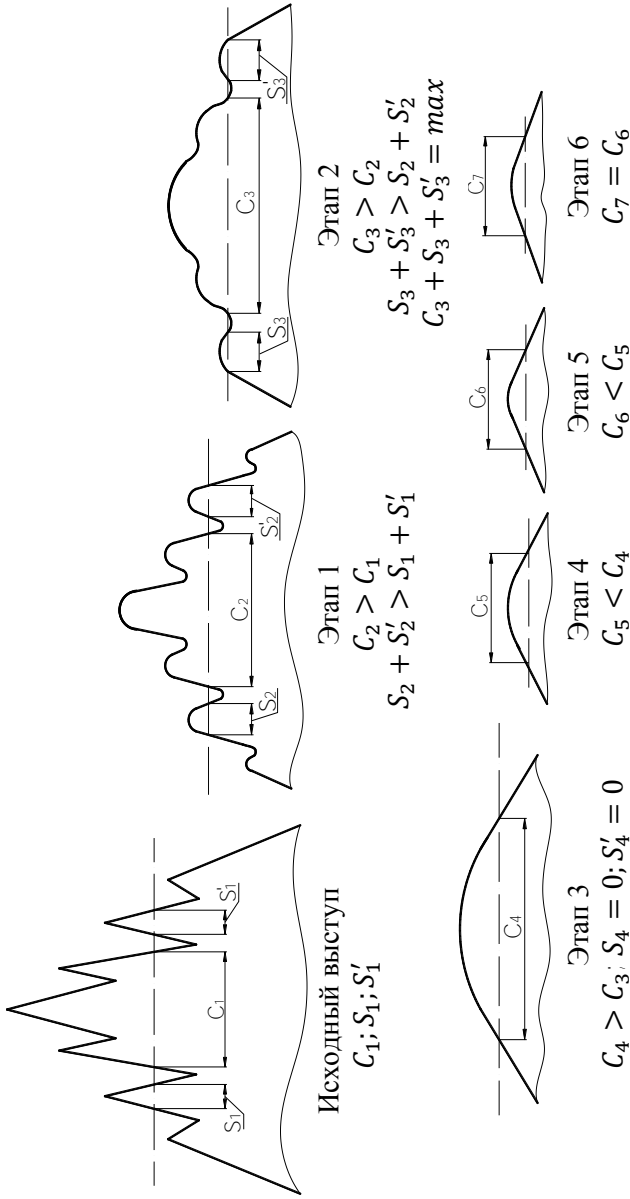
Таким образом, независимо от вида обрабатываемого материала и уровня шероховатости исходной поверхности в исследованном диапазоне значений ($Ra^{нач}$ от 0,53 до 1,40 мкм) в процессе ЭИП формирование профиля поверхности происходит вследствие равновероятного сглаживания систематических и случайных неровностей профиля. При этом случайные неровности, расположенные на выступах и во впадинах профиля поверхности и имеющие существенно меньшие размеры по сравнению с систематическими неровно-

стями, сглаживаются за более короткое время. Наибольшая скорость сглаживания систематических и случайных неровностей наблюдается в первые минуты обработки. При увеличении продолжительности ЭИП до 5–10 мин доля случайных неровностей в структуре шероховатости существенно снижается. Дальнейшая обработка приводит к профилю, сформированному сглаженными систематическими неровностями с большим периодом. При этом в структуре случайных неровностей профиля доминирующее положение занимают неровности, обусловленные микроструктурой сплава, проявившейся на полированной поверхности вследствие селективного растворения структурных составляющих сплава.

5.2. Геометрическая модель формирования профиля поверхности

На основании представленных в разделе 5.1 экспериментальных данных и результатов вероятностно-статистического исследования профиля поверхности можно предложить следующую геометрическую модель формирования профиля в условиях ЭИП [273, 276, 282]. Моделирование выполним на примере сглаживания единичного выступа профиля, которое для удобства визуального восприятия графической информации по аналогии с профилограммой выполним при вертикальном увеличении, значительно превышающем горизонтальное (рис. 5.16).

Профиль исходной поверхности, сформированный в результате механической обработки, представляет собой композицию из различных по высоте и ширине основных выступов и впадин и местных выступов, расположенных на основных выступах и впадинах профиля. На рис. 5.16 эта композиция представлена в виде единичного исходного выступа. В процессе ЭИП растворение основного и местных выступов происходит с равной вероятностью, в результате чего основной и местный выступы сглаживаются, что приводит к постепенному увеличению ширины выступа на средней линии профиля и уменьшению угла наклона боковых линий выступа (этапы 1 и 2 на рис. 5.16). Продолжение обработки приводит к полному растворению местных выступов (этап 3 на рис. 5.16).



C_i – ширина основного выступа; $S_i; S'_i$ – ширина местных выступов

Рис. 5.16. Схема сглаживания единичного выступа профиля поверхности в процессе ЭИП

При этом ширина выступа на средней линии профиля достигает максимального значения. Дальнейшая обработка способствует дополнительному сглаживанию выступа, уменьшению его высоты и ширины на средней линии профиля и угла наклона боковых линий выступа (этапы 4–6 на рис. 5.16). Выступ так же, как и профиль поверхности, становится гладким и пологим, что подтверждают экспериментальные данные, приведенные в разделе 5.1.3. Так, из данных, представленных на рис. 5.12, *a*, следует, что средний квадратический угол наклона профиля исходной поверхности образца из стали 10 с $Ra^{нач}$ 1,30 и 0,78 мкм, рассчитанный из выражения (5.1), равен соответственно $12^{\circ}24'26''$ и $10^{\circ}45'28''$. После ЭИП в течение 10 мин при температуре электролита 65°C средний квадратический угол наклона профиля снижается соответственно до $2^{\circ}10'34''$ и $1^{\circ}29'22''$. При продолжении обработки наступает момент, когда средний квадратический наклон профиля поверхности достигает минимально возможного значения, которое в большей мере определяется не столько наклоном боковых линий не полностью растворившихся выступов профиля, сколько средним квадратическим наклоном профиля поверхности элементов микроструктуры сплава, проявившейся на полированной поверхности вследствие селективного растворения структурных составляющих сплава.

Парадоксальное, на первый взгляд, уменьшение ширины выступа на средней линии профиля, показанное на этапах 4–6 рис. 5.16, можно объяснить следующим образом. В соответствии с ГОСТ 25142–82 [269] средняя линия профиля поверхности проводится таким образом, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально. При уменьшении высоты выступа и угла наклона его боковых линий происходит смещение средней линии профиля к вершине выступа, что приводит к уменьшению ширины выступа на средней линии. В пользу этого положения свидетельствуют экспериментальные данные о пропорциональном уменьшении высоты наибольшего выступа R_p и наибольшей высоты неровностей профиля R_{max} , представленные в табл. 5.2.

Адекватность предложенной модели подтверждают фотографии поверхности образца из стали 20, представленные на рис. 5.17, которые наглядно демонстрируют, что в условиях ЭИП сглаживание неровностей профиля поверхности происходит с равной вероятно-

стью на выступах и во впадинах профиля с одновременным снижением высоты неровностей, увеличением радиусов выступов и впадин и уменьшением наклона профиля (рис. 5.17, *a-d*).

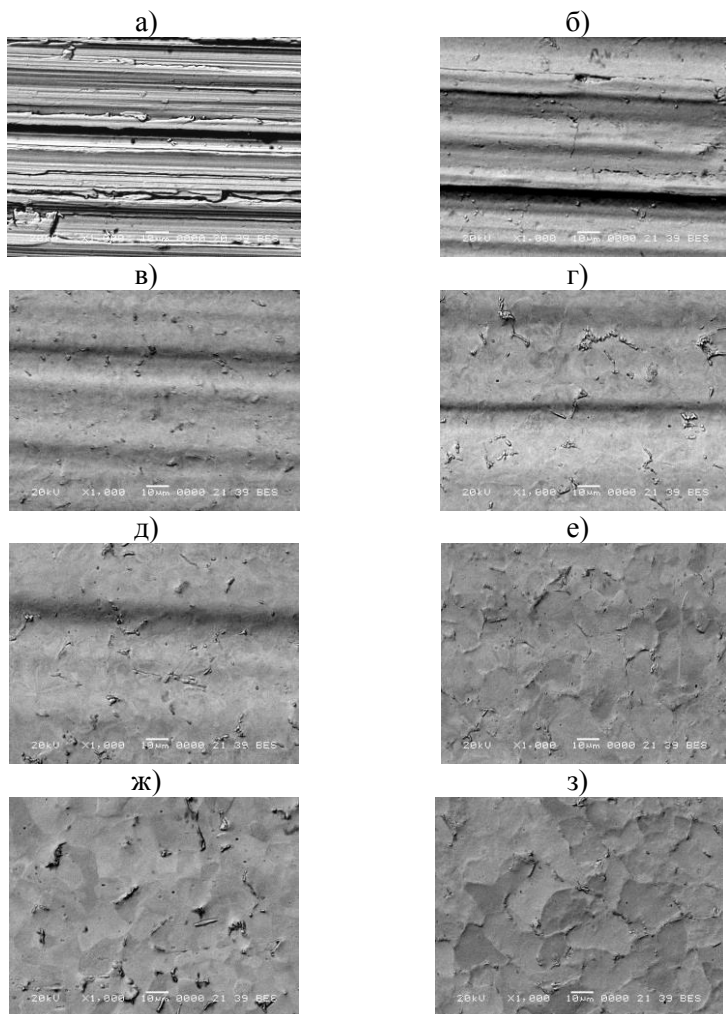


Рис. 5.17. Эволюция топографии в процессе ЭИП стали 20 (x1000).

Продолжительность обработки, с:

a – исходная поверхность; *б* – 20; *в* – 40; *г* – 60; *д* – 90; *е* – 120; *ж* – 180; *з* – 300

Так же видно (рис. 5.17, *е–з*), что уровень минимально достигнутой шероховатости поверхности ограничивается микроструктурой сплава, проявляющейся на полированной поверхности вследствие селективного растворения структурных составляющих сплава.

Следует отметить, что равновероятное растворение неровностей профиля, включающих местные выступы, расположенные на выступах и во впадинах профиля, свидетельствует о пробое ПГО электролитными мостиками с равной вероятностью как на выступах, так и во впадинах профиля поверхности.

5.3. Влияние электроимпульсного полирования на блеск поверхности низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей

Блеск поверхности, не являясь, строго говоря, характеристикой ее качества, в большинстве случаев оказывает существенное влияние на потребительские свойства изделий. В разделах 1.1.2 и 1.1.3 было показано, что при ХП и ЭХП достигается двойной эффект – поверхность сглаживается и приобретает блеск. При этом считается [25, 34–36], что блеск поверхности в значительной мере связан с ее шероховатостью – чем выше неоднородность структуры шероховатости, тем ниже блеск поверхности. В разделе 3.2.1 отмечено влияние концентрации раствора электролита, в частности, концентрации хлорид-ионов, на блеск поверхности при ЭИП стали 20. Установленный механизм и основные технологические закономерности формирования профиля поверхности в условиях ЭИП позволяют предположить, что ЭИП на оптимальных режимах обработки должно оказывать положительное влияние на блеск поверхности сплавов на основе железа, хрома и никеля. Однако следует отметить, что, несмотря на очевидную значимость высокого уровня блеска, повышающего конкурентоспособность изделий различного назначения, исследования влияния технологических режимов ЭИП на блеск поверхности не проводились.

Изучение динамики изменения блеска при ЭИП низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей проводилось по методике, приведенной в разделе 2.3.5. На рис. 5.18 представлены данные, показывающие влияние продолжительности обработки, температуры электролита и уровня исходной шероховатости на

блеск поверхности конструкционной углеродистой стали 10 и коррозионностойкой стали 20X13 [277].

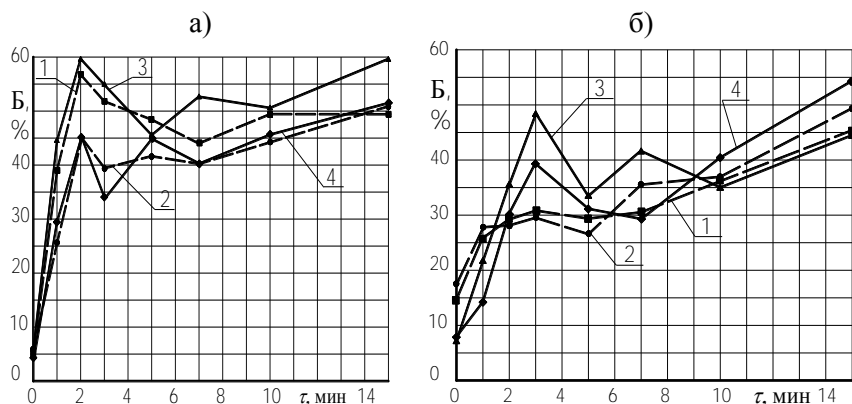


Рис. 5.18. Зависимость блеска поверхности от продолжительности ЭИП:

а – сталь 10:

1 – $Ra^{\text{нач}}$ 1,30 мкм, $T_{\text{эл}}=65$ °С; 2 – $Ra^{\text{нач}}$ 1,30 мкм, $T_{\text{эл}}=85$ °С;

3 – $Ra^{\text{нач}}$ 0,78 мкм, $T_{\text{эл}}=65$ °С; 4 – $Ra^{\text{нач}}$ 0,63 мкм, $T_{\text{эл}}=85$ °С;

б – сталь 20X13:

1 – $Ra^{\text{нач}}$ 1,12 мкм, $T_{\text{эл}}=65$ °С; 2 – $Ra^{\text{нач}}$ 1,40 мкм, $T_{\text{эл}}=85$ °С;

3 – $Ra^{\text{нач}}$ 0,52 мкм, $T_{\text{эл}}=65$ °С; 4 – $Ra^{\text{нач}}$ 0,53 мкм, $T_{\text{эл}}=85$ °С.

Из данных, представленных на рис. 5.18, *а*, следует, что при ЭИП стали 10 уровень блеска, близкий к максимально возможному значению, достигается за 2 мин обработки. При этом средняя квадратическая длина волны профиля λq так же достигает максимальной величины (рис. 5.11, *а*), а средний квадратический наклон профиля Δq – значений, близких к минимально возможному уровню (рис. 5.12, *а*). Шероховатость поверхности снижается с $Ra^{\text{нач}}$ 1,30 мкм до Ra 0,47–0,49 мкм и с $Ra^{\text{нач}}$ 0,63–0,78 мкм до Ra 0,18–0,33 мкм (рис. 5.2, *а; б*). Следовательно, наблюдаемая динамика изменения параметров шероховатости λq и Δq , свидетельствующая о быстром сглаживании местных выступов профиля, положительным образом влияет на повышение блеска поверхности. Следует отметить, что обработка при более низкой температуре электролита (65 °С) существенно повышает блеск поверхности в первые 1–3 мин обработки вне зависимости от уровня шероховато-

сти исходной поверхности (кривые 1; 3 на рис. 5.18, *a*). Последующая обработка на протяжении 2–7 мин приводит к снижению блеска относительно достигнутого уровня, в то время как параметры шероховатости Ra и λq достигают значений, близких к минимально возможным (рис. 5.2 *a*; *b* и 5.11, *a*). Снижение средней квадратической длины волны профиля λq указывает на негативное влияние роста уровня случайной составляющей профиля, обусловленной проявившейся микроструктурой (рис. 5.17, *z–z*), на блеск поверхности. Продолжение обработки свыше 7 мин способствует монотонному росту блеска.

Аналогичный характер зависимости блеска от продолжительности обработки наблюдается при ЭИП коррозионнотойкой стали 20X13 (рис. 5.18, *b*). Однако в этом случае более выраженный экстремальный характер зависимости наблюдается на временном интервале от 2 до 5 мин при обработке поверхности с более низкой исходной шероховатостью вне зависимости от температуры электролита (кривые 3; 4 на рис. 5.18, *b*). Следует отметить, что именно на этом временном интервале происходит рост средней квадратической длины волны профиля λq до максимального значения (рис. 5.11, *b*) и снижение среднего квадратического наклона профиля Δq (рис. 5.12, *b*) и параметра Ra (рис. 5.2, *z*) до уровней, близких к минимально возможным. Следовательно, как и при ЭИП стали 10, наблюдаемая динамика изменения параметров шероховатости λq и Δq , свидетельствующая о сглаживании местных выступов профиля, положительным образом влияет на повышение блеска поверхности стали 20X13. Продолжение обработки свыше 5 мин способствует монотонному росту блеска вне зависимости от уровня шероховатости исходной поверхности и температуры электролита.

Таким образом, сглаживание неровностей профиля низколегированных углеродистых и коррозионнотойких сталей в условиях ЭИП приводит к нивелированию структуры шероховатости и повышению блеска поверхности вследствие снижения рассеивания света. Наиболее выраженный эффект на повышение блеска оказывает сглаживание местных выступов профиля, обеспечивающее высокий уровень блеска за относительно короткое время обработки. Сглаживание основных выступов и впадин, способствуя формированию гладкого, пологого профиля, обеспечивает высокий уровень блеска поверхности на более продолжительных временных интервалах. Для обеспечения высокого декоративного внешнего вида изде-

лий, изготовленных из низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей, ЭИП следует проводить соответственно в течение 2–10 и 3–15 мин.

Аналогичный эффект повышения блеска поверхности наблюдается при ХП и ЭХП в режиме глянцеваия, при котором достигается достаточно высокий уровень блеска за счет сглаживания местных выступов профиля при незначительном снижении высоты основных выступов и толщине снимаемого слоя металла менее 1 мкм [34, 35, 46, 47].

5.4. Влияние электроимпульсного полирования на твердость поверхности низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей

Твердость является одним из важнейших механических свойств поверхностного слоя и оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики поверхности деталей машин [13, 31]. Известно [35], что ЭХП изменяет физико-механические свойства обработанной поверхности, в частности, снижает ее твердость. В настоящее время в литературе отсутствуют достоверные данные о влиянии ЭИП на распределение микротвердости в нормальном к поверхности образца сечении. По этим причинам было проведено исследование влияния ЭИП на твердость тонкого поверхностного слоя [233, 293], которое проводилось по методике, приведенной в разделе 2.3.8. Для устранения влияния возможных неоднородностей механических свойств поверхностного слоя на распределение микротвердости, а также для изучения возможного влияния вида предварительной термической обработки на распределение микротвердости все образцы перед ЭИП прошли соответствующую обработку (табл. 5.4), выполненную согласно [219]. Для удаления дефектного поверхностного слоя образцы после термической обработки шлифовались на плоскошлифовальном станке мод. ОШ 224 Н на чистовых режимах, после чего полировались в течение 8 мин при напряжении обработки 300 В и температуре электролита 70 °С. ЭИП образцов из сталей 20 и У8А проводилось в 1,5%-м водном растворе хлорида аммония, из стали 40Х13 – в 4,5%-м водном растворе сульфата аммония. В процессе ЭИП дефектный поверхностный слой, оставшийся после шлифования, был удален полностью.

Таблица 5.4 – Вид и режимы термической обработки образцов

Вид и режимы термической обработки	Марка стали		
	20	У8А	40Х13
Отжиг			
– температура нагрева, °С	905	740	800
– время выдержки, мин	30	30	30
– охлаждение	с печью	с печью	с печью
Нормализация			
– температура нагрева, °С	–	750	–
– время выдержки, мин	–	20	–
– охлаждение	–	на воздухе	–
Закалка			
– температура нагрева, °С	–	780	1050
– время выдержки, мин	–	15	10
– охлаждение	–	в воде	в масле
Отпуск			
– температура нагрева, °С	–	300	300
– время выдержки, мин	–	25	25
– охлаждение	–	на воздухе	на воздухе

На рис. 5.19 показано влияние ЭИП на распределение микротвердости в поверхностном слое в нормальном к поверхности образца сечении. Из данных, представленных на рис. 5.19 (кривые 3–5), следует, что ЭИП не влияет на твердость поверхностного слоя отожженной стали 40Х13 и сталей У8А и 40Х13, прошедших закалку с последующим отпуском. Однако ЭИП стали У8А, прошедшей нормализацию или отжиг, снижает микротвердость поверхностного слоя соответственно от 375 МПа на поверхности до 75 МПа на глубине 15 мкм и от 255 МПа на поверхности до 38 МПа на глубине 35 мкм (кривые 1; 2 на рис. 5.19). Наибольшее снижение микротвердости происходит у отожженной стали 20, которое составляет от 500 МПа на поверхности до 100 МПа на глубине 25 мкм (кривая 6 на рис. 5.19). Как было показано в разделе 3.2.4, при ЭИП низколегированных углеродистых сталей в водном растворе хлорида аммония происходит обезуглероживание тонкого поверхностного слоя. Обработка коррозионностойких

сталей в электролите, содержащем сульфат аммония, не вызывает обезуглероживания поверхностного слоя и снижения его твердости вне зависимости от фазового состава этих сталей.

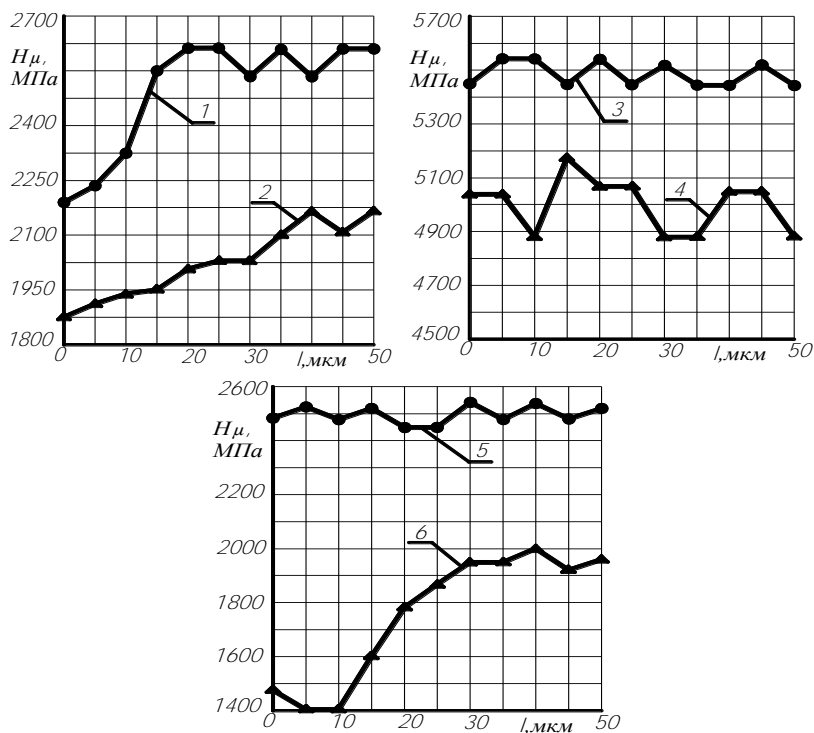


Рис. 5.19. Распределение микротвердости в поверхностном слое:
 1; 2, 3 – соответственно нормализованная, отожженная и закаленная+отпущенная
 сталь У8А; 4; 5 – соответственно закаленная+отпущенная и отожженная сталь
 40Х13; 6 – отожженная сталь 20

Таким образом, учитывая возможное обезуглероживание тонкого поверхностного слоя в процессе ЭИП, при полировании изделий из низколегированных углеродистых сталей в водном растворе хлорида аммония следует учитывать их функциональное назначение и вид предварительной термической обработки.

6. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, ХРОМА И НИКЕЛЯ

ЭИП как процесс, связанный с изменением топографии и физико-химического состояния поверхности, может оказывать влияние на ее эксплуатационные характеристики. В разделе 1.3.1 показано, что в настоящее время влияние ЭИП на эксплуатационные характеристики поверхности деталей изучено недостаточно. В связи с этим было проведено исследование влияния ЭИП на коррозионную стойкость поверхности низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей, склонность коррозионностойких сталей к межкристаллитной коррозии, коэффициент трения, электромагнитные характеристики магнитопроводов трансформаторов, адгезионную прочность и качество вакуумно-плазменных и гальванических хромовых покрытий.

6.1. Коррозионная стойкость низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей

Одной из причин, приводящих к снижению качества продукции, разрушению конструкций, а также к авариям и несчастным случаям на производстве, является коррозия металлов, которая представляет собой процесс самопроизвольного разрушения металлов вследствие химического, электрохимического или биохимического взаимодействия металлов со средой. Скорость коррозионного разрушения детали зависит от большого числа факторов: химического и фазового состава металла, окружающей среды, наличия защитных покрытий, условий эксплуатации, качества поверхности и от случайных факторов [11, 13, 31, 35, 40–43]. Формирование поверхности, характеризующейся низкой шероховатостью, минимальной толщиной дефектного поверхностного слоя и минимальным количеством несовершенных элементов кристаллической решетки, возможно при введении в технологический процесс обработки детали финишных операций: тонких механических доводочных процессов, ХП, ЭХП, ЭИП и других. В разделе 1.3.1 показано, что в настоящее время имеется недостаточное количество экспериментальных данных о

влиянии ЭИП на коррозионную стойкость поверхности деталей. По этой причине, а также для сопоставления и анализа результатов было проведено исследование коррозионной стойкости поверхности шлифованных, электрохимически и электроимпульсно полированных образцов из конструкционной углеродистой стали 10 и коррозионностойкой стали 20X13 методом изменения массы образца и методом снятия поляризационных кривых [295] по методикам, приведенным в разделе 2.3.9.

На рис. 6.1 в виде диаграмм представлена скорость коррозии сталей 10 и 20X13 в зависимости от метода предварительной обработки поверхности. Для метода изменения массы образца скорость коррозии рассчитывалась по (2.19).

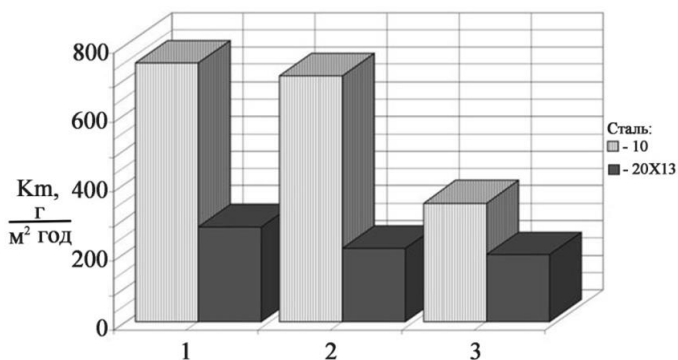


Рис. 6.1. Скорость коррозии сталей 10 и 20X13 в зависимости от метода предварительной обработки поверхности.

Метод предварительной обработки поверхности:

1 – тонкое шлифование, 2 – ЭХП, 3 – ЭИП

Из данных, представленных на рис. 6.1, следует, что образцы, обработанные методом ЭИП, имеют наименьшие коррозионные потери. Так, ЭИП образца из стали 10 по сравнению с ЭХП и тонким шлифованием снижает скорость коррозии соответственно в 2,08 и 2,18 раза, а ЭИП образца из стали 20X13 – соответственно в 1,09 и 1,41 раза.

Учитывая то, что коррозия металлов протекает по электрохимическому механизму [40–43], включающему два сопряженных процесса – анодный и катодный, изменение массы образца за время

коррозионного испытания в соответствии с первым и вторым законами Фарадея [41, 45] можно представить в виде

$$\Delta m = q_{\text{Me}} \cdot i \cdot S \cdot \tau \cdot \text{ВТ}_{\text{Me}}, \quad (6.1)$$

где Δm – изменение массы образца за время коррозионного испытания, г; q_{Me} – электрохимический эквивалент металла, г/А·ч; i – плотность тока коррозии, А/м²; S – площадь поверхности образца до испытания, м²; τ – продолжительность коррозионного испытания, ч; ВТ_{Me} – выход металла по току, %.

При отсутствии внешней поляризации в реальном коррозионном процессе скорость растворения металла (скорость коррозии) зависит от эффективности протекания катодного процесса. Допустив, что коррозионному разрушению в испытуемых сталях подвергается только железо в расчете на Fe^{2+} , для которого $q_{\text{Fe}^{2+}} = 1,042$ г/А·ч [41], а катодный процесс при коррозии пренебрежимо мал по сравнению с анодным процессом (в этом случае примем $\text{ВТ}_{\text{Fe}^{2+}} \approx 100\%$), скорость коррозии с учетом принятых допущений и выражений (2.19) и (6.1) можно определить как:

$$K_m = \frac{\Delta m}{\tau \cdot S} = \frac{q_{\text{Fe}^{2+}} \cdot i \cdot S \cdot \tau \cdot \text{ВТ}_{\text{Fe}^{2+}}}{\tau \cdot S} = q_{\text{Fe}^{2+}} \cdot i,$$

где K_m – скорость коррозии, г/м²·ч.

Откуда получим выражение для определения плотности тока коррозии:

$$i = \frac{K_m}{q_{\text{Fe}^{2+}}}. \quad (6.2)$$

По (6.2) рассчитаны значения плотности тока коррозии для коррозионных испытаний по методу изменения массы образца, приведенные в табл. 6.1.

Особенностью коррозионных процессов является участие в них свободных электронов [40, 42]. Скорость таких процессов пропорциональна числу электронов, отводимых от поверхности металла в единицу времени. Следовательно, скорость коррозии является линейной функцией тока коррозии.

Таблица 6.1 – Величина плотности тока коррозии

Марка стали	Метод изменения массы образца			Метод снятия поляризационных кривых		
	Плотность тока коррозии i , мкА/см ²			Плотность тока коррозии i , мкА/см ²		
	Метод обработки поверхности			Метод обработки поверхности		
	Шлифование	ЭХП	ЭИП	Шлифование	ЭХП	ЭИП
10	8,16	7,77	3,74	3,550	2,240	0,630
20X13	2,97	2,3	2,11	0,120	0,087	0,059

На рис. 6.2 представлены поляризационные кривые для образцов из сталей 10 и 20X13, полученные методом снятия поляризационных кривых [294] и построенные в полулогарифмических (тафелевских) координатах «напряжение–логарифм плотности тока». Плотность тока коррозии, значения которой приведены в табл. 6.1, определялась по величине абсциссы точки пересечения экстраполированных линейных участков катодной и анодной поляризационной кривых (рис. 6.2), проведенных вблизи стационарного потенциала [294].

Данные по плотности тока коррозии, полученные методом снятия поляризационных кривых (см. табл. 6.1), свидетельствуют о том, что по сравнению с образцами, обработанными методами ЭХП и тонкого шлифования, у образцов, обработанных методом ЭИП, скорость коррозии значительно ниже. Так, у образца из стали 10 скорость коррозии ниже соответственно в 3,56 и 5,63 раза, из стали 20X13 – соответственно в 1,47 и 2,03 раза. Высокую коррозионную стойкость поверхности электроимпульсно полированных образцов можно объяснить тем, что в результате ЭИП в большей степени снижается электрохимическая неоднородность поверхности по сравнению с исследованными методами обработки. Кроме того, благоприятное влияние ЭИП на коррозионную стойкость поверхности связано с формированием топографии, характеризующейся плавностью формы, меньшей эффективной площадью поверхности, контактирующей с внешней средой, и меньшим количеством концентраторов очагов коррозии.

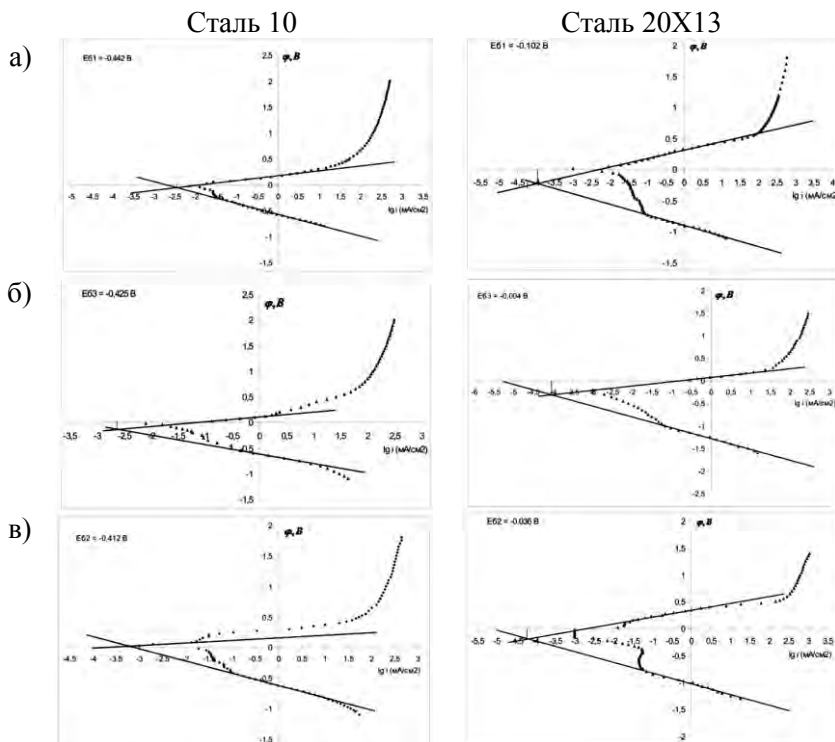


Рис. 6.2. Поляризационные кривые для образцов из сталей 10 и 20X13.
 Метод предварительной обработки поверхности:
a – тонкое шлифование, *б* – ЭХП, *в* – ЭИП

Таким образом, полученные экспериментальные данные показывают, что ЭИП деталей, изготовленных из сплавов на основе железа, хрома и никеля, позволяет в значительной степени повысить их коррозионную стойкость и, следовательно, надежность и долговечность.

6.2. Стойкость коррозионностойкой стали 12X18Н10Т против межкристаллитной коррозии

Одним из опасных видов коррозионного разрушения, приводящего к резкому снижению физико-механических свойств металла без заметного изменения его внешнего вида, является межкристал-

литная коррозия. По современным представлениям [363] причиной развития межкристаллитной коррозии является химическая гетерогенность между объемом зерен и приграничными областями. Коррозия этого вида наблюдается на хромистых и хромоникелевых сталях, сплавах на основе никеля, меди, алюминия и других. На коррозионностойких сталях межкристаллитная коррозия может развиваться в результате реализации трех механизмов [363]:

- коррозия, связанная с обеднением приграничных областей зерен элементами, обеспечивающими стойкость стали в данной среде;
- коррозия, связанная с низкой химической стойкостью выделяющихся по границам зерен фаз;
- коррозия, вызванная сегрегацией по границам зерен поверхностно-активных элементов, снижающих стойкость основы стали в данной среде.

Электрохимическая неоднородность сплава, способствующая развитию межкристаллитной коррозии, чаще всего возникает в результате структурных превращений в определенном для конкретного сплава интервале температур, например, при сварке. На развитие межкристаллитной коррозии может также оказывать влияние механическая и электрофизическая обработка [43]. Проблема, связанная с межкристаллитной коррозией металла и со склонностью сварного шва к межкристаллитной коррозии, особенно остро стоит в атомной энергетике, химической и пищевой промышленности, где используется большое количество деталей, узлов и сварных изделий, работающих в сильно агрессивных средах.

Изучение влияния ЭИП на стойкость коррозионностойкой стали 12X18H10T против межкристаллитной коррозии выполнялось методом АМУ [364] по методике, приведенной в разделе 2.3.9. При проведении испытаний исследуемые образцы выдерживались в течение 8 ч в кипящем водном растворе сернокислой меди и серной кислоты в присутствии медной стружки. Раствор для испытаний содержал 1000 см³ дистиллированной воды, 50 г сернокислой меди по ГОСТ 4165–78 и 250 см³ серной кислоты квалификации х.ч. плотностью 1,84 г/см³ по ГОСТ 4204–77. По окончании выдержки образцы промывались в дистиллированной воде, сушились фильтровальной бумагой, изгибались на угол 90° в соответствии с требованиями ГОСТ 14019–2003, после чего проводился осмотр внешней стороны места изгиба с использованием лупы с увеличением 12

крат. Изгиб образцов производился в двух местах – по металлу сварного шва и на расстоянии 20 мм от сварного шва. В результате осмотра трещин в области изгиба образцов не выявлено. Согласно ГОСТ 6032–84 отсутствие трещин на поверхности изогнутого образца свидетельствует о стойкости стали 12Х18Н10Т, обработанной методом ЭИП, против межкристаллитной коррозии.

Дополнительно в соответствии с ГОСТ 6032–84 для оценки склонности стали 12Х18Н10Т, обработанной методом ЭИП, к межкристаллитной коррозии использовался металлографический метод. В этом случае из неизогнутого участка образца, прошедшего коррозионные испытания, вырезались пластины из основного металла и по металлу сварного шва, которые использовались для изготовления шлифов. Поверхность реза на пластинах являлась плоскостью шлифа. Наличие и глубина межкристаллитной коррозии оценивалась оптическим методом с использованием комплекса микро- и макроанализа на базе микроскопа МКИ-2М-1 (Планар, Беларусь). На рис. 6.3 представлены фотографии поверхности шлифов.

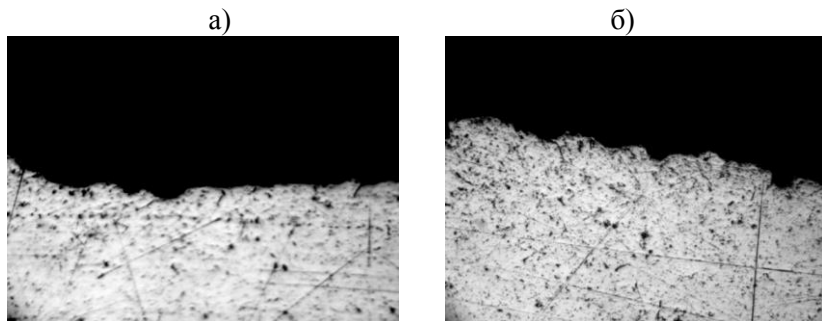


Рис. 6.3. Шлиф плоскости реза в нормальном к поверхности образца сечении (x250):
а – основной металл, *б* – металл сварного шва

На представленных фотографиях видно, что после ЭИП профиль поверхности образцов имеет сглаженный вид, на поверхности образцов отсутствуют микротрещины и нет разрушения границ зерен металла, что, согласно ГОСТ 6032–84, свидетельствует о стойкости стали 12Х18Н10Т, обработанной методом ЭИП, против межкристаллитной коррозии.

Таким образом, ЭИП не вызывает у коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т склонности к межкристаллитной коррозии.

6.3. Коэффициент трения

В процессе эксплуатации поверхностные слои деталей подвергаются различным видам воздействий: изнашиванию, усталостному и коррозионному разрушениям и другим. Известно [11, 13], что качество поверхности в значительной степени определяет эксплуатационные характеристики поверхности деталей. ЭИП как процесс, связанный с изменением топографии и физико-механических свойств поверхности [90, 206, 311], оказывает влияние на триботехнические характеристики поверхности [149, 222]. Однако в настоящее время имеется недостаточное количество экспериментальных данных, позволяющих судить о степени влияния ЭИП на триботехнические характеристики поверхности. По этим причинам было проведено исследование влияния ЭИП на коэффициент трения, величина которого рассчитывалась по (2.22). Для сопоставления результатов трибологическим испытаниям подвергались шлифованные, механически и электроимпульсно полированные образцы из стали 40Х13 [307, 308] по методике, приведенной в разделе 2.3.11.

На рис. 6.4 представлена динамика коэффициента трения в условиях трения скольжения с достаточной подачей смазочного материала в зону трения в зависимости от метода финишной обработки поверхности. Из представленных данных следует, что ЭИП обеспечивает наименьший коэффициент трения по сравнению с тонким шлифованием и механическим полированием. В начале испытания коэффициент трения электроимпульсно полированной поверхности по сравнению со шлифованной и механически полированной поверхностями ниже соответственно на 29,6 и 6,9 %, а в конце испытания – на 47,8 и 12,5 %. В ходе испытания происходит монотонное снижение коэффициента трения вне зависимости от метода предварительной обработки поверхности. При этом слабо выраженный этап приработки продолжительностью до 750 с наблюдается для механически обработанных поверхностей (кривые 1 и 2 на рис. 6.4). Для электроимпульсно полированной поверхности этап приработки трибосопряжения отсутствует – коэффициент трения монотонно снижается с момента начала и до конца испытания (кривая 3 на рис. 6.4).

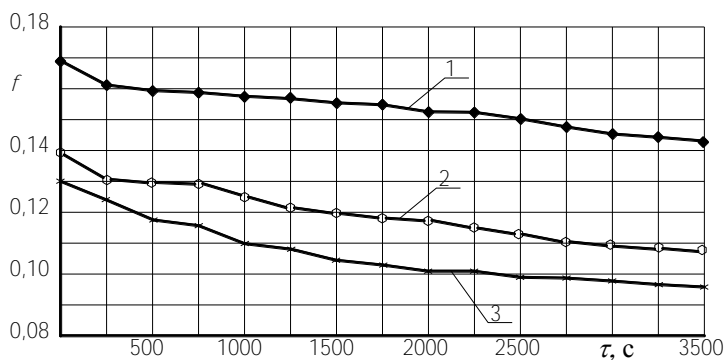


Рис. 6.4. Динамика коэффициента трения в зависимости от метода финишной обработки поверхности:
 1 – тонкое шлифование, 2 – механическое полирование, 3 – ЭИП

Выявленные факты можно объяснить следующим образом. Лучшие антифрикционные свойства электроимпульсно полированной поверхности связаны, прежде всего, не столько с низкой шероховатостью, сколько с благоприятной топографией. В разделе 5.1 показано, что в отличие от механических методов обработки при ЭИП формируется топография, характеризующаяся низкой высотой и большим радиусом округления выступов и плавностью неровностей профиля с большим периодом. В результате этого период приработки трибосопряжения, связанный в первую очередь с пластическим деформационным разрушением неровностей при их контакте с поверхностью контртела и формированием «равновесной шероховатости» [365, 366], отсутствует или выражен очень слабо. Работа трибосопряжения сразу начинается с упругого контактирования неровностей. Более низкий коэффициент трения при принятой схеме испытания объясняется меньшей площадью фактического пятна контакта контртела с сопряженной поверхностью и согласно (2.22) большим давлением в области фрикционного контакта.

На рис. 6.5 представлена динамика изменения коэффициента трения при периодическом капельном введении смазочного материала в область фрикционного контакта. Зависимость коэффициента трения от продолжительности испытания в условиях ограниченной

смазки показывает, что в момент введения смазки происходит скачкообразное уменьшение коэффициента трения более чем на 21 % с последующим его постепенным увеличением до исходного уровня на достаточно протяженном промежутке времени, что свидетельствует о хорошем удержании смазочного материала электроимпульсно полированной поверхностью вследствие сформированной в процессе обработки топографии, включающей случайные неровности, обусловленные микроструктурой сплава.

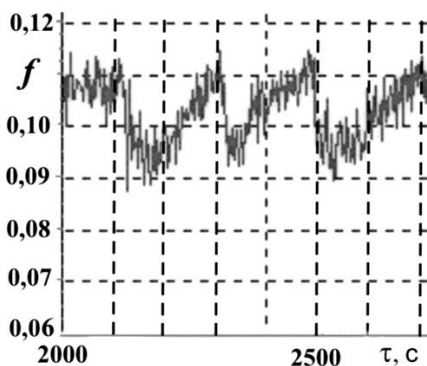


Рис. 6.5. Динамика изменения коэффициента трения при капельном введении смазочного материала в зону трения

В условиях сухого трения скольжения происходит резкое повышение коэффициента трения – более чем в 4 раза для механически и электроимпульсно полированных поверхностей и более чем в 5,5 раза для шлифованной поверхности.

Таким образом, благодаря сформированной в процессе обработки благоприятной топографии, ЭИП способствует существенному улучшению триботехнических характеристик поверхности деталей, работающих в условиях трения скольжения с достаточной и ограниченной подачей смазочного материала.

6.4. Электромагнитные характеристики разрезных витых ленточных магнитопроводов трансформаторов

При резке абразивным кругом витых ленточных магнитопроводов трансформаторов на поверхности реза образуется слой замыкания смежных пластин толщиной около 10 мкм, в котором индуктируются токи большой мощности. Кроме того, в местах реза и сгиба пластин происходит изменение структуры металла магнитопровода на глубину до 100 мкм. Вследствие этих причин электромагнитные потери в магнитопроводах трансформаторов возрастают более чем на 60 % по сравнению с потерями в исходном металле. Зазоры, возникающие в местах сопряжения частей магнитопровода при сборке трансформатора, могут привести к увеличению тока холостого хода трансформатора более чем на 95 % [367].

Для изучения возможности снижения потерь в разрезных витых ленточных магнитопроводах за счет ЭИП плоскости реза обработке подвергались магнитопроводы трансформаторов ОСМ1 номинальной мощностью 0,1 кВА. Обработка плоскости реза производилась в 1,5%-м водном растворе хлорида аммония при напряжении обработки 300 В и температуре электролита 80–90 °С [368]. На испытательном стенде Минского электротехнического завода им. В.И. Козлова измерялся ток холостого хода трансформатора и удельные потери на перемагничивание в магнитопроводах до и после обработки. Для визуального контроля поверхности реза использовался металлографический микроскоп МИМ-7.

В ходе испытаний установлено, что при ЭИП в течение от 0,5 до 1,0 мин с поверхности реза удаляется дефектный слой металла и заусенцы, замыкающие соседние пластины, острые кромки пластин притупляются, что снижает удельные потери на перемагничивание на 25–30 %. При увеличении продолжительности обработки до 1,5–2,0 мин удельные потери на перемагничивание достигают минимальных значений. Однако при увеличении продолжительности обработки свыше 1,0 мин вследствие увеличения отклонения от плоскостности поверхности реза, приводящего к ухудшению точности сопряжения поверхностей частей магнитопровода, ток холостого хода трансформатора возрастает.

Таким образом, для улучшения электромагнитных характеристик разрезных витых ленточных магнитопроводов трансформаторов продолжительность ЭИП плоскости реза не должна превышать 1,0 мин.

6.5. Адгезионная прочность и качество вакуумно-плазменных покрытий

Качество и эксплуатационные характеристики поверхности деталей с тонкопленочными вакуумно-плазменными покрытиями, нанесенными методом конденсации вещества из плазменной фазы, во многом определяются состоянием исходной поверхности, которое обеспечивается технологией ее подготовки перед нанесением покрытия [155, 369, 370]. Целью предварительной подготовки поверхности является создание необходимой топографии с шероховатостью менее Ra 1,25 мкм, удаление дефектного поверхностного слоя, поверхностных пленок различной природы и инородных включений, а также тщательная очистка поверхности от всех видов загрязнений. Традиционные методы предварительной подготовки (механическое полирование, ХП и ЭХП, ультразвуковая очистка, а также комбинированные методы) отличаются большой трудоемкостью и не всегда гарантируют высокую степень очистки и снижение шероховатости обрабатываемой поверхности, в результате чего затрудняется заключительная операция по подготовке поверхности непосредственно в вакуумной камере перед нанесением покрытия [155, 369].

Для оценки влияния ЭИП подложки на механические свойства и качество вакуумно-плазменных покрытий исследовалось влияние ЭИП подложки на адгезионную прочность, сквозную пористость и шероховатость поверхности вакуумно-плазменного покрытия TiN, которое проводилось на подложках из коррозионностойкой стали 12X18H10T [236, 299–303, 371] по методике, приведенной в разделе 2.3.10. Адгезионная прочность покрытия рассчитывалась по (2.20). В этом разделе приняты следующие обозначения шероховатости поверхности, сформированной на разных этапах обработки: Ra_1 – среднее арифметическое отклонение профиля исходной (шлифованной) поверхности образца, Ra_2 – после ЭИП образца и Ra_3 – после нанесения покрытия TiN на поверхность электроимпульсно полированного образца.

Адгезионная прочность и пористость являются важнейшими характеристиками износо- и коррозионностойких вакуумно-плазменных покрытий и оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики деталей с тонкопленочными вакуумно-плазменными покрытиями [155, 370]. Испытания показали, что при снижении шероховатости электроимпульсно полированной поверхности подложки с Ra_2 0,70–0,90 мкм до Ra_2 0,20–0,24 мкм адгезионная прочность покрытия увеличивается с 380 до 490 МПа (на 28,9 %) (кривая 1 на рис. 6.6). При дальнейшем снижении шероховатости поверхности подложки адгезионная прочность возрастает незначительно.

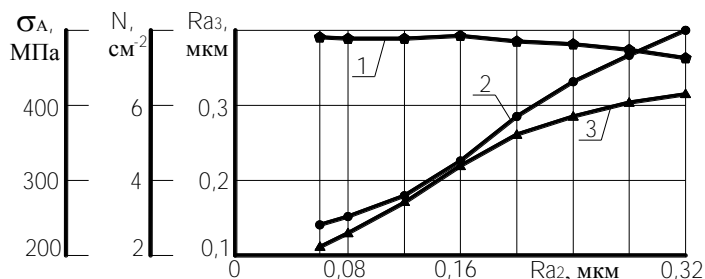


Рис. 6.6. Характеристики качества тонкопленочного покрытия TiN: 1 – адгезионная прочность покрытия σ_A ; 2 – количество сквозных пор в покрытии N ; 3 – шероховатость поверхности с покрытием Ra_3

Анализ экспериментальных данных по пористости покрытия показал, что при уменьшении шероховатости поверхности подложки с Ra_2 0,70 до Ra_2 0,20 мкм количество сквозных пор в покрытии снижается на 54 % и стабилизируется на уровне 2,8–4,2 см² для подложек с Ra_2 0,06–0,16 мкм (кривая 2 на рис. 6.6), что ниже в 3,6–3,8 раза по сравнению со шлифованными подложками, для которых характерна мелкая пористость около 10,0–16,0 см². Появление пор в покрытии авторы работ [155, 369] связывают с газовой пористостью, возникающей вследствие замуровывания азота в объеме покрытия, и частичного образования TiN не на поверхности конденсации, а в газовой фазе. Снижение пористости покрытия на электроимпульсно полированной поверхности подложки, вероятно, связано с тем, что при ЭИП формируется благоприятная для нане-

сения вакуумно-плазменных покрытий топография, характеризующаяся плавным, сглаженным рельефом с малой высотой и большими радиусами округления вершин и впадин неровностей.

Из представленных на рис. 6.6 (кривая 3) данных о шероховатости поверхности следует, что на всех образцах после нанесения покрытия шероховатость поверхности увеличилась. Анализ зависимости шероховатости поверхности с покрытием от исходной шероховатости подложки выявил следующие закономерности. При шероховатости поверхности подложки $Ra_2 > 0,50$ мкм существенного увеличения шероховатости поверхности с покрытием не происходит: $Ra_2/Ra_3 \rightarrow 1$. Однако при $0,20 < Ra_2 < 0,50$ мкм покрытие повышает шероховатость в среднем на 0,03 мкм и в среднем на 0,04 мкм при $Ra_2 < 0,20$ мкм. Очевидно, что данный эффект связан с особенностями структуры шероховатости электроимпульсно полированной поверхности и процесса нанесения вакуумно-плазменных покрытий методом конденсации вещества из плазменной фазы в условиях бомбардировки поверхности ускоренными ионами. При низкой шероховатости электроимпульсно полированной поверхности в структуре случайной составляющей шероховатости доминирующее положение занимает проявившаяся на поверхности микроструктура сплава (рис. 6.7, а).

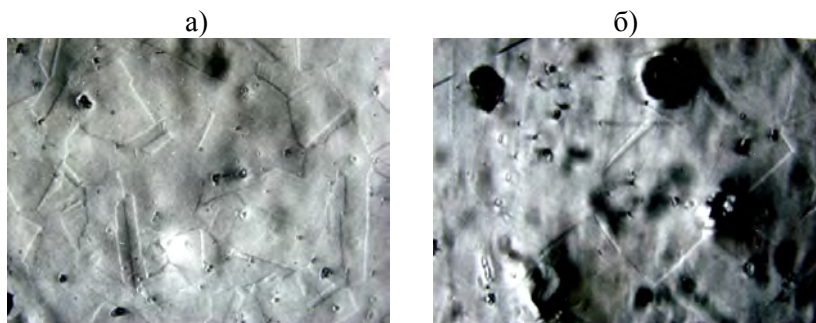


Рис. 6.7. Топография образца из стали 12Х18Н10Т после ЭИП:
а – x200; б – x1000

В структуре стали 12Х18Н10Т присутствуют карбиды титана, которые при ЭИП вследствие затрудненного анодного растворения

формируют характерные дефекты – кратеры, выступающие над поверхностью (рис. 6.7, б). Различно ориентированные грани кристаллитов и поверхностные дефекты повышают гетерогенность поверхности. При нанесении покрытия TiN под действием ускоряющего напряжения конденсация вещества из плазменной фазы происходит с бóльшей вероятностью на выступах профиля поверхности [155, 369]. При малой высоте поверхностных элементов структуры и относительно большой по сравнению с ними толщине покрытия влияние покрытия на шероховатость поверхности становится более заметным при более низкой шероховатости поверхности подложки.

В ходе исследования дополнительно изучалось влияние ЭИП подложки на качество подготовки поверхности подложки путем ее ионной очистки непосредственно в вакуумной камере. В этом случае сравнивалась адгезионная прочность покрытия на механически и электроимпульсно полированных подложках (рис. 6.8).

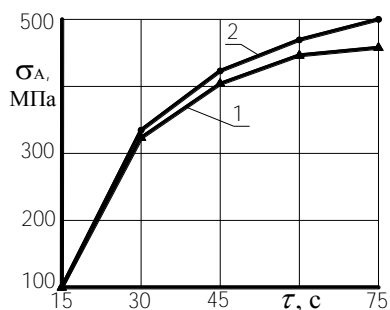


Рис. 6.8. Влияние продолжительности ионной очистки подложки в вакуумной камере на адгезионную прочность покрытия TiN.

Метод обработки поверхности подложки:

1 – механическое полирование, 2 – ЭИП

Из данных, представленных на рис. 6.8, следует, что при длительности очистки в вакуумной камере менее 30–45 с адгезионная прочность в обоих случаях практически одинакова. При этом покрытие характеризуется низким качеством вплоть до частичного отслаивания от подложки и непригодно для использования по прямому назначению. Объясняется это тем, что за этот промежуток времени не обеспечивается полное удаление оксидных и адсорбци-

онно-фазовых пленок с поверхности подложки, а температура подложки не достигает достаточной величины, обеспечивающей эффективное протекание плазмохимических реакций. При длительности очистки более 45 с покрытия в обоих случаях обладают хорошими характеристиками. Однако на электроимпульсно полированной подложке по сравнению с механически полированной подложкой адгезионная прочность покрытия выше на 25–30 МПа. Связано это с тем, что при механическом полировании на поверхности образуется дефектный слой, включающий аморфизированные структуры [372], препятствующие образованию прочных адгезионных связей между покрытием и подложкой. Максимальная адгезионная прочность покрытия TiN обеспечивается на электроимпульсно полированных подложках с Ra_2 0,06–0,24 мкм (кривая 1 на рис. 6.6) при продолжительности ионной очистки в вакуумной камере от 45 до 75 с.

На основании полученных данных разработан способ подготовки металлических поверхностей перед нанесением вакуумно-плазменных покрытий [373], согласно которому для обеспечения высоких механических свойств и качества вакуумно-плазменных покрытий шероховатость поверхности ограничивается следующими значениями: $Ra_1 \leq 1,25$ – $1,50$ мкм, $Ra_2 \geq 0,04$ – $0,06$ мкм при $Ra_1/Ra_2 \leq 17$. При соблюдении граничных условий продолжительность ЭИП определяется из выражения

$$\tau = k_1 \cdot \frac{h}{v} + k_2 \cdot A \cdot \left(\frac{Ra_1}{Ra_2} \right)^B,$$

где τ – продолжительность ЭИП, мин; h – толщина дефектного поверхностного слоя металла, мкм; v – скорость съема металла с поверхности, мкм/мин; Ra_1 ; Ra_2 – среднее арифметическое отклонение профиля поверхности изделия соответственно после предварительной механической обработки и ЭИП, мкм; A – коэффициент, мин; B ; k_1 и k_2 – безразмерные коэффициенты.

Коэффициенты k_1 и k_2 выбираются из условия

$$\begin{cases} k_1 = 1; k_2 = 0, \text{ если } \frac{h}{v} \geq A \cdot \left(\frac{Ra_1}{Ra_2}\right)^B \\ k_1 = 0; k_2 = 1, \text{ если } \frac{h}{v} \leq A \cdot \left(\frac{Ra_1}{Ra_2}\right)^B \end{cases} .$$

Таким образом, ЭИП вследствие формирования в процессе обработки благоприятной топографии, удаления дефектного поверхностного слоя металла, загрязнений различной природы, оксидных и адсорбционно-фазовых поверхностных пленок способствует формированию высококачественных тонкопленочных вакуумно-плазменных покрытий. Высокая адгезионная прочность, незначительная сквозная пористость и низкая шероховатость поверхности вакуумно-плазменного покрытия TiN обеспечиваются на подложках с шероховатостью поверхности Ra_2 0,06–0,24 мкм при продолжительности ионной очистки поверхности подложки в вакуумной камере от 45 до 75 с.

6.6. Адгезионная прочность и качество гальванических покрытий

Структура гальванического покрытия и его свойства в значительной мере определяются начальным актом электрохимического процесса – возникновением кристаллических зародышей осадка на поверхности подложки [263]. Этот акт неразрывно связан не только с условиями электролиза, но и с состоянием поверхности, на которой происходит разряд ионов металла. Известные в гальванотехнике способы подготовки поверхности деталей включают операции обезжиривания, травления и активации, в результате которых поверхность очищается от механических и химических загрязнений, продуктов коррозии и тонких оксидных пленок [1, 3, 6, 8, 10, 263]. Однако при этом не выявляется истинная структура металла, которая была искажена предшествующими операциями механической обработки, что может отрицательно влиять на качество гальванического покрытия. Решение данной проблемы возможно при использовании ХП или ЭХП в качестве операций, предшествующих электроосаждению. Известно [34, 35], что ХП или ЭХП поверхности

изделий перед нанесением гальванических покрытий повышает их адгезионную прочность.

Для оценки влияния ЭИП подложки на механические свойства и качество гальванических покрытий исследовалось влияние ЭИП подложки на адгезионную прочность и качество гальванического твердого хромового покрытия, которое проводилось на подложках из конструкционной углеродистой стали 10 [297, 298] по методике, приведенной в разделе 2.3.10. Расчет адгезионной прочности покрытия производился по (2.21). На рис. 6.9 представлена зависимость адгезионной прочности гальванического хромового покрытия от продолжительности ЭИП подложки.

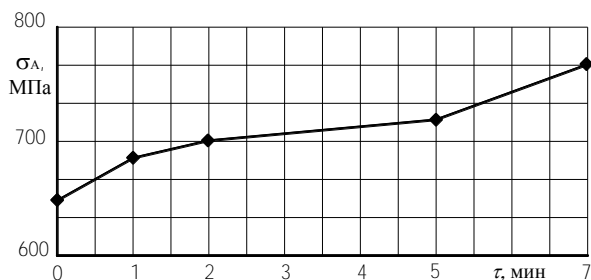


Рис. 6.9. Зависимость адгезионной прочности хромового покрытия от продолжительности ЭИП подложки

Полученные данные свидетельствуют о положительном влиянии ЭИП на адгезионную прочность и, следовательно, эксплуатационные характеристики покрытия. Так, ЭИП подложки в течение 7 мин обеспечивает повышение адгезионной прочности гальванического хромового покрытия на 11,4 % по сравнению с уровнем прочности, достигнутым после 1 мин полирования подложки, или на 17,9 % (с 648 до 764 МПа) по сравнению с адгезионной прочностью покрытия, нанесенного на шлифованную поверхность подложки. Наибольший рост адгезионной прочности покрытия наблюдается после ЭИП подложки в течение 1 мин и составляет 5,7 % по сравнению с адгезионной прочностью покрытия, нанесенного на шлифованную поверхность. При обработке поверхности подложки в интервале от 1 до 5 мин темп роста адгезионной прочности покрытия замедляется и составляет в среднем 1,2 % на каждую 1 мин об-

работки. В интервале от 5 до 7 мин темп роста адгезионной прочности несколько возрастает и составляет в среднем 3,5 %.

Наблюдаемую динамику роста адгезионной прочности гальванического хромового покрытия можно объяснить следующим образом. При нанесении покрытия на шлифованную шероховатую поверхность осаждение ионов хрома начинается на вершинах выступов профиля. По этой причине в покрытии возникают дополнительные изгибающие моменты. При осаждении хрома на электроимпульсно полированную поверхность повышение адгезионной прочности связано с тем, что в процессе ЭИП наряду с резким снижением шероховатости поверхности подложки (рис. 5.2 *а*; *б*) и формированием благоприятной топографии (рис. 5.16) происходит удаление дефектного поверхностного слоя металла, уменьшается количество несовершенных элементов кристаллической решетки на поверхности подложки (рис. 6.10) и устраняется направленная анизотропия магнитных свойств, возникающая на этапе предварительной механической обработки. В результате, осаждение ионов хрома происходит на более электрохимически однородную поверхность, что приводит к снижению изгибающих моментов и, соответственно, напряжений в покрытии и положительно влияет на его адгезионную прочность.

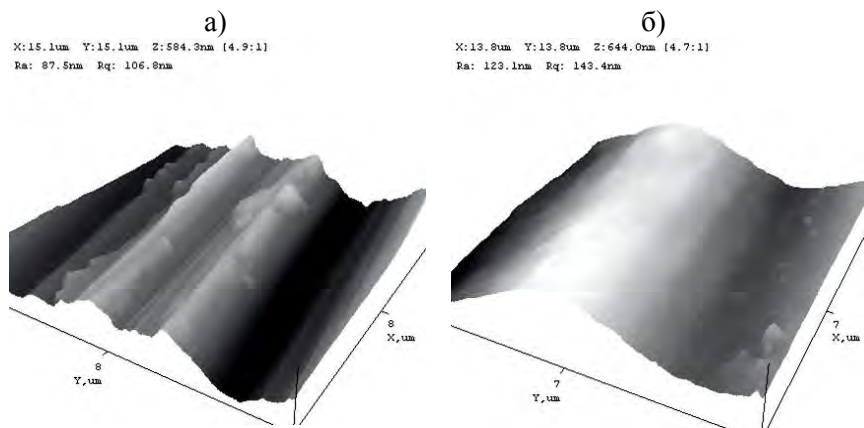


Рис. 6.10. Топография шлифованной поверхности (а) и поверхности после ЭИП в течение 10 с (б)

Анализ полученных данных показал, что увеличение продолжительности ЭИП подложки помимо положительного влияния на адгезионную прочность хромового покрытия способствует уменьшению количества сфероидов в покрытии на 65–75 % и существенно улучшает его внешний вид (рис. 6.11).

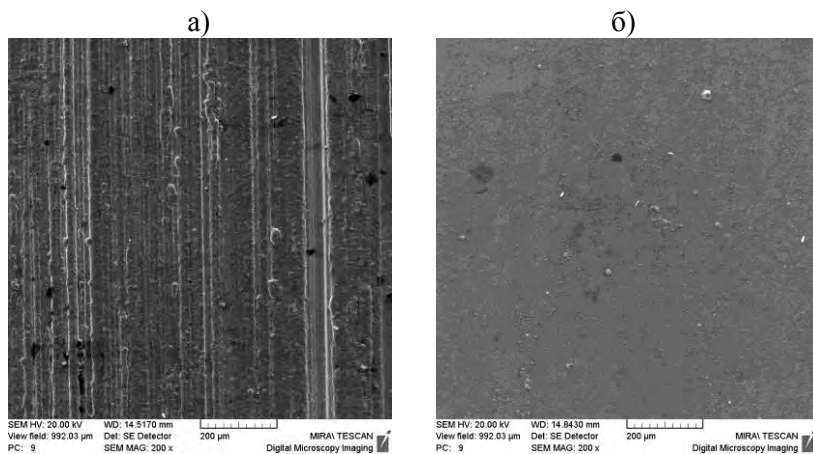


Рис. 6.11. Внешний вид хромового покрытия на шлифованной подложке (а) и подложке после ЭИП в течение 7 мин (б)

Таким образом, учитывая, что основные закономерности электроосаждения различных металлов и соединений во многом подобны, можно предположить, что предварительное ЭИП поверхности изделий будет способствовать повышению механических свойств и качества различных гальванических покрытий. На примере гальванического хромового покрытия показано, что по сравнению со шлифованием ЭИП подложки в течение 7 мин позволяет повысить адгезионную прочность покрытия на 17,9 %, снизить количество сфероидов в покрытии на 65–75 % и существенно улучшить внешний вид покрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов проведенных комплексных исследований разработаны теоретические основы ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля, устанавливающие взаимосвязь между электрохимическим поведением компонентов сплавов и характером физико-химических процессов, протекающих на обрабатываемой поверхности, с химическим составом и величиной рН водного раствора электролита, напряжением обработки и температурой электролита, что впервые позволило представить и обосновать процесс съема металла в условиях ЭИП как процесс анодного растворения компонентов сплавов, протекающий в области смешанной электрохимической и диффузионной кинетики по механизму комплексообразования через ряд последовательных или последовательно-параллельных промежуточных стадий.

Предложена концептуальная модель коммутационного механизма электрической проводимости ПГО в условиях ЭИП, согласно которой ток, имеющий в своем составе квазипостоянную и высокочастотную составляющие, обусловлен ионной проводимостью в электролитных мостиках, коммутирующих ПГО, и ионной проводимостью газовой фазы ПГО. Показано, что основной вклад в суммарный ток (более 90 %) вносит ионная проводимость в электролитных мостиках. Теоретически обосновано, что аномально высокая электропроводность электролита в электролитных мостиках обусловлена высокой подвижностью ионов вследствие сверхбыстрого разогрева электролита джоулевым теплом и реализацией эффекта Вйна, а образование и обновление ПГО вызвано тепловым взрывным механизмом разрушения электролитных мостиков.

Впервые установлено и показано, что в условиях ЭИП геометрические факторы обработки (форма и размеры электролитической ячейки и электродов, расположение электродов относительно друг друга и относительно стенок ячейки) и физико-механические свойства электролита не оказывают заметного влияния на точность обработки.

В результате изучения динамики сглаживания профиля поверхности впервые установлено, что формирование профиля при ЭИП происходит вследствие равновероятного сглаживания систематических и случайных неровностей профиля, в результате чего предло-

жена геометрическая модель формирования профиля, устанавливающая связь между параметрами профиля и продолжительностью обработки. Показано, что случайные неровности, представляющие собой местные выступы и впадины, расположенные на выступах и во впадинах профиля, сглаживаются за более короткое время вследствие существенно меньших размеров по сравнению с основными выступами и впадинами профиля. Увеличение продолжительности обработки приводит к профилю, сформированному сглаженными систематическими неровностями с большим периодом. При этом в структуре случайных неровностей профиля доминирующее положение занимают неровности, обусловленные микроструктурой обрабатываемого сплава, проявившейся на поверхности вследствие селективного анодного растворения компонентов сплава, и ограничивающие минимально возможный уровень шероховатости поверхности.

Экспериментально установлены основные технологические закономерности формирования геометрических параметров качества поверхности при ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля. Показано, что основными факторами, влияющими на эффективность сглаживания шероховатости, являются: природа обрабатываемого сплава, химический состав, концентрация и температура электролита, уровень шероховатости исходной поверхности и продолжительность обработки. В результате изучения динамики изменения параметров шероховатости, связанных с высотными свойствами неровностей профиля поверхности, предложена математическая модель и разработан алгоритм назначения режимов обработки при ЭИП конструкционных углеродистых и коррозионностойких сталей, устанавливающие взаимосвязь значений параметров Ra , Rz и $Rmax$ с уровнем шероховатости исходной поверхности, температурой электролита, продолжительностью обработки и величиной съема металла.

При изучении влияния ЭИП на эксплуатационные характеристики поверхности деталей установлено, что ЭИП значительно повышает коррозионную стойкость конструкционных углеродистых и коррозионностойких сталей, не вызывает у коррозионностойких сталей склонности к межкристаллитной коррозии, обеспечивает наименьший коэффициент трения по сравнению с тонким шлифованием и механическим полированием, снижает удельные потери

на перемагничивание в разрезных витых ленточных магнитопроводах, существенно повышает адгезионную прочность и качество вакуумно-плазменных и гальванических покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грилихес, С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / С.Я. Грилихес; под ред. П.М. Вячеславова. – Л.: Машиностроение, 1983. – 101 с.
2. Интенсификация и автоматизация отделочно-зачистной обработки деталей машин: тез. докл. науч.-технич. конф., Ростов н/Д, 1988 г. / РИСХМ; редкол.: А.П. Бабичев [и др.]. – Ростов н/Д, 1988. – 167 с.
3. Вайнер, Я.В. Технология электролитических покрытий / Я.В. Вайнер, М.А. Дасоян. – Л.: Машиностроение, 1972. – 464 с.
4. Ящерицын, П.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П.И. Ящерицын, А.Г. Зайцев, А.И. Барботько. – Минск: Наука и техника, 1976. – 328 с.
5. Ящерицын, П.И. Чистовая обработка деталей в машиностроении: учеб. пособие / П.И. Ящерицын, А.Н. Мартынов. – Минск: Вышэйшая школа, 1983. – 191 с.
6. Гальванотехника: справ. изд. / Ф.Ф. Ажогин [и др.]. – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.
7. Гамма шлифовального и полировального инструмента – втулки, круги, головки, валики, мини-диски и др. WENDT // Российская ассоциация литейщиков [Электронный ресурс]. – 2005–2010: – Режим доступа: <http://rainfo.ru/work/168/5619/5678/6746>. – Дата доступа: 16.04.2010.
8. Инженерная гальванотехника в приборостроении / Е.А. Баранов [и др.]; под ред. А.М. Гинберга. – М.: Машиностроение, 1977. – 512 с.
9. Грилихес, С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / С.Я. Грилихес. – Л.: Машиностроение, 1977. – 112 с.
10. Мельников, П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении / П.С. Мельников. – М.: Машиностроение, 1979. – 296 с.
11. Фельдштейн, Е.Э. Управление формированием качества поверхности деталей при механической обработке: монография / Е.Э. Фельдштейн, И.Л. Баршай, В.К. Шелег. – Минск: БНТУ, 2006. – 227 с.
12. Мрочек, Ж.А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин: Учеб. пособие / Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов. – Минск: Технопринт, 2000. – 268 с.
13. Баршай, И.Л. Обеспечение качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей машин при обработке в условиях

дискретного контакта с инструментом: монография / И.Л. Баршай. – Минск: Технопринт, 2003. – 244 с.

14. Гдалевич, А.И. Финишная обработка лепестковыми кругами / А.И. Гдалевич. – М.: Машиностроение, 1990. – 111 с.

15. Устинович, Д.Ф. Классификация методов обработки полимерно-абразивными волоконными композитами / Д.Ф. Устинович // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XI междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 13–18 сент. 2004 г.: в 5 т. / Донецк: ДонНТУ. – 2004. – Т. 3. – С. 198–200.

16. Устинович, Д.Ф. Исследование контактного взаимодействия полимерно-абразивной щетки с поверхностью детали / Д.Ф. Устинович // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. трудов VI Междунар. науч.-техн. конф., Новополюцк, 24–26 апр. 2007 г.: в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополюцк, 2007. – Т. 2. – С. 91–94.

17. Проволоцкий, А.Е. Повышение производительности процесса обработки полимер-абразивными инструментами / А.Е. Проволоцкий, С.Л. Негруб, Д.А. Старостин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междун. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонНТУ. – 2005. – Вып. 32. – С. 193–200.

18. Михайлов, М.И. Оптимизация связи рабочей части инструмента при кольцевой обработке чугуна в среде свободного абразива / М.И. Михайлов, В.П. Кириленко, А.Л. Зайцев // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 2. – С. 10–13.

19. Оборудование для виброшлифовки, струйной обработки, для пресной воды, устройства автоматизации и технологические средства, установки для окраски мелких деталей WALTER TROWAL // Российская ассоциация литейщиков [Электронный ресурс]. – 2005–2010: – Режим доступа: <http://rainfo.ru/work/168/5619/5678/5786>. – Дата доступа: 16.04.2010.

20. Менаджиев, О.Р. Анодно-ультразвуковая обработка как метод электрохимической отделки поверхности металлоизделий / О.Р. Менаджиев // Интенсификация и автоматизация отделочно-зачистной обработки деталей машин: тез. докл. науч.-технич. конф., Ростов-н/Д, 1988 г. / Ростовский ин-т сельскохоз. машиностр.; редкол.: А.П. Бабичев [и др.]. – Ростов н/Д, 1988. – С. 23–25.

21. Самосудов, А.П. Интенсификация отделочной обработки внутренних цилиндрических поверхностей / А.П. Самосудов, Е.М. Кузнецова // Интенсификация и автоматизация отделочно-зачистной обработки деталей машин: тез. докл. науч.-технич. конф., Ростов н/Д, 1988 г. / Ростовский ин-т сельскохоз. машиностр.; редкол.: А.П. Бабичев [и др.]. – Ростов н/Д, 1988. – С. 27–28.

22. Спичко, А.С. Струйно-абразивная обработка / А.С. Спичко. – М.: НИИМАШ, 1968. – 55 с.

23. Коновалов, Е.Г. Основы электро-ферромагнитной обработки / Е.Г. Коновалов, Ф.Ю. Сакулевич. – Минск: Наука и техника, 1974. – 272 с.

24. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.

25. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / под общ. ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение, 1988. – 719 с.

26. Барон, Ю.М. Физические закономерности процесса магнитно-абразивной обработки / Ю.М. Барон // Интенсификация и автоматизация отделочно-зачистной обработки деталей машин: тез. докл. науч.-технич. конф., Ростов н/Д, 1988 г. / Ростовский ин-т сельскохоз. машиностр.; редкол.: А.П. Бабичев [и др.]. – Ростов н/Д, 1988. – С. 112–113.

27. Ефремов, В.Д. Получение малых закруглений рабочих кромок магнитно-абразивной доводкой / В.Д. Ефремов [и др.] // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. трудов VI междунар. науч.-техн. конф., Новополок, 24–26 апр. 2007 г.: в 3 т. / под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополок: Полоцкий гос. ун-т. – 2007. – Т. 2. – С. 98–101.

28. Михайлов, А.Н. Формирование технологической зоны при магнитно-абразивной обработке сложных пространственных поверхностей / А.Н. Михайлов, А.В. Пелих // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междун. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонНТУ. – 2007. – Вып. 34. – С. 157–162.

29. Одинцов, Л.Г. Применение проволочных инструментов / Л.Г. Одинцов // Технология автомобилестроения. – 1982. – № 5. – С. 6–10.

30. Серебрицкий, П.П. Обработка деталей металлическими щетками / П.П. Серебрицкий. – Л.: Лениздат, 1967. – 152 с.
31. Шнейдер, Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулируемым микрорельефом / Ю.Г. Шнейдер. – Л.: Машиностроение, 1982. – 248 с.
32. Баршай, И.Л. Формирование шероховатости поверхности при иглофрезеровании / И.Л. Баршай, С.П. Гончаров // Машиностроение: республ. сб. науч. трудов – Минск: БНТУ. – 2007. – Вып. 22. – С. 356–358.
33. Абугов, А.Л. Качество поверхности после отделочно-зачистной обработки иглофрезерованием / А.Л. Абугов, И.Л. Баршай // Интенсификация и автоматизация отделочно-зачистной обработки деталей машин: тез. докл. науч.-технич. конф., Ростов н/Д, 1988 г. / Ростовский ин-т сельскохоз. машиностр.; редкол.: А.П. Бабичев [и др.]. – Ростов н/Д, 1988. – С. 45–47.
34. Липкин, Я.Н. Химическое полирование металлов / Я.Н. Липкин, Т.М. Бершадская. – М.: Машиностроение, 1988. – 112 с.
35. Грилихес, С.Я. Электрохимическое и химическое полирование: Теория и практика. Влияние на свойства металлов / С.Я. Грилихес. – Л.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
36. Попилов, Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник / Д.Я. Попилов. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.
37. Тегард, В. Электролитическое и химическое полирование металлов: пер. с англ. / В. Тегард; под ред. П.В. Щиголева. – Л.: Изд-во иностр. лит., 1957. – 180 с.
38. Жаке, П. Электролитическое и химическое полирование / П. Жаке. – М.: Metallurgizdat, 1959. – 139 с.
39. Щигалев, П.В. Электролитическое и химическое полирование металлов / П.В. Щигалев. – М.: АН СССР, 1959. – 186 с.
40. Жук, Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н.П. Жук. – М.: Metallurgia, 1976. – 472 с.
41. Рачев, Х. Справочник по коррозии: перевод с болгарского / Х. Рачев, С. Стефанова; под ред. Н.И. Исаева. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
42. Малахов, А.И. Коррозия и основы гальваностегии: учебник для техникумов / А.И. Малахов, К.М. Тютинина, Т.Е. Цупак. – М.: Химия, 1987. – 208 с.

43. Коррозия. Справочник: пер. с англ. / под ред. Л.Л. Шрайера. – М.: Металлургия, 1981. – 632 с.

44. Электрохимическая обработка металлов / И.И. Мороз [и др.]; под ред. И.И. Мороза. – М.: Машиностроение, 1969. – 208 с.

45. Основы теории и практики электрохимической обработки металлов и сплавов / М.В. Щербак [и др.]. – М.: Машиностроение, 1981. – 263 с.

46. Бершадская, Т.М. Исследование и разработка процессов химического полирования сталей: дис. ... канд. хим. наук: 05.17.14 / Т.М. Бершадская. – Челябинск, 1978. – 186 с.

47. Балмасов, А.В. Повышение качества поверхности металлов методами электрохимической и химической обработки: закономерности и технологические решения: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.17.03 / А.В. Балмасов; Ивановский гос. химико-технол. ун-т. – Иваново, 2007. – 33 с.

48. Кириллов, В.И. Новые способы химического полирования деталей из углеродистых сталей / В.И. Кириллов, Л.В. Изюмова. – Л.: ЛДНТП, 1979. – 28 с.

49. Зеленкова, А.Т. Влияние ингибиторов на травление нержавеющей стали 1X18N9T в смеси кислот / А.Т. Зеленкова, А.Г. Самарцев // Журнал прикладной химии. – 1965. – Т. 38. – Вып. 5. – С. 1033–1037.

50. Справочное руководство по гальванотехнике. ч. 1: пер. с нем. / Под ред. В.И. Лайнера. – М.: Metallurgizdat, 1969. – 415 с.

51. Хор, Т.П. Возникновение и нарушение пассивного состояния металлов / Т.П. Хор // Защита металлов. – 1967. – Т. 3. – Вып. 2. – С. 20–33.

52. Липкин, Я.Н. Особенности химического полирования сталей / Я.Н. Липкин [и др.] // Защита металлов. – 1984. – № 6. – С. 908–913.

53. Лайнер, В.И. Электролитическая полировка и травление металлов / В.И. Лайнер. – М.: Машгиз, 1947. – 80 с.

54. Elmor, W.C. Electrolytic Polishing / W.C. Elmor // J. Appl. Phys. – 1940. – Vol. 11, No 12. – P. 797–799.

55. Попилов, Л.Я. Электрополирование и электротравление металлографических шлифов / Л.Я. Попилов, Л.П. Зайцева. – М.: Металлургиздат, 1951. – 310 с.

56. Jacquet, P.A. The Electrolytic Polishing of Metallic Surfaces / P.A. Jacquet // Metal Finishing. – 1949. – Part II. – 83 p.

57. Галушко, В.П. Электролитическая полировка металлов / В.П. Галушко, П.М. Федаш // Труды казанского химико-технологического университета. – 1952. – Вып. 17. – С. 46–57.
58. Федаш, П.М. Электролитическая полировка металлов / П.М. Федаш, В.П. Галушко // Науч. записки ДГУ. – 1951. – № 37. – С. 36–41.
59. Балезин, С.А. Ингибиторы коррозии / С.А. Балезин, П.Г. Кузнецов, Н.А. Подольный. – М.: Судостроение, 1965. – 18 с.
60. Попилов, Л.Я. Электролитическая полировка металлов / Л.Я. Попилов, Л.П. Зайцева. – М.: Машгиз, 1947. – 201 с.
61. Эванс, Ю.Р. Коррозия и окисление металлов / Ю.Р. Эванс. – М.: Машгиз, 1962. – 856 с.
62. Хор, Т.П. Анодное поведение металлов / Т.П. Хор // Новые проблемы современной электрохимии. – М.: Изд-во иностр. л-ры, 1962. – С. 284–376.
63. Эванс, Ю.Р. Коррозия, пассивность и защита металлов / Ю.Р. Эванс. – М.: Metallurgizdat, 1941. – 886 с.
64. Томашов, Н.Д. Теория коррозии и защиты металлов / Н.Д. Томашов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 591 с.
65. Кинетика электродных процессов / А.Н. Фрумкин [и др.] – М.: МГУ, 1952. – 319 с.
66. Валеев, А.Ш. О механизме процесса анодного растворения железа в электролите, содержащем окислитель. Структурные изменения поверхности / А.Ш. Валеев, М.А. Чвала // Электрохимия. – 1969. – Т. 5, Вып. 6. – С. 655–657.
67. Липкин, Я.Н. Химическая и электрохимическая обработка стальных труб / Я.Н. Липкин, В.М. Штанько. – М.: Metallurgiya, 1982. – 255 с.
68. Карязин, П.П. Электрохимическая полировка нержавеющей и углеродистых сталей в электролитах с добавкой поверхностно-активных веществ: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.03 / П.П. Карязин. – Свердловск, 1974. – 208 с.
69. Штанько, В.М. Электрохимическое полирование металлов / В.М. Штанько, П.П. Карязин. – М.: Metallurgiya, 1979. – 160 с.
70. Воздвиженский, Г.С. Электродекристаллизация металлов / Г.С. Воздвиженский // Доклады АН СССР. Серия химических наук. – 1949. – Т. 59. – № 9. – С. 1587–1589.

71. Воздвиженский, Г.С. К вопросу о механизме электрохимической полировки металлов и структуре электрополированной поверхности / Г.С. Воздвиженский, Г.А. Горбачук, Г.П. Дезидерьев // Доклады АН СССР. Серия химических наук. – 1958. – Т. 120. – № 4. – С. 101–102.

72. Воздвиженский, Г.С. Некоторые дискуссионные вопросы механизма электролитической полировки / Г.С. Воздвиженский // Известия казанского филиала АН СССР. Серия химических наук. – 1959. – № 5. – С. 23–34.

73. Воздвиженский, Г.С. Механизм электролитической полировки металлов и структура электрополированной поверхности по данным электронноскопических исследований / Г.С. Воздвиженский, Г.А. Горбачук, Г.П. Дезидерьев // Известия казанского филиала АН СССР. Серия химических наук. – 1961. – № 6. – С. 129–143.

74. Воздвиженский, Г.С. К вопросу об анодной пассивации в условиях электролитической полировки. Анодная защита металлов / Г.С. Воздвиженский. – М.: Машиностроение, 1964. – 496 с.

75. Тиранская, С.М. О влиянии состава и структуры углеродистых сталей на процесс электрохимического полирования / С.М. Тиранская // Украинский химический журнал. – 1955. – Т. 21. – Вып. 1. – С. 177–186.

76. Тиранская, С.М. О влиянии состава и структуры углеродистых сталей на процесс электрополировки / С.М. Тиранская // Украинский химический журнал. – 1958, – Т. 34. – Вып. 4. – С. 533–540.

77. Тиранская, С.М. Исследование влияния состава и структуры углеродистых сталей на процесс электрополировки: дис. ... канд. техн. наук / С.М. Тиранская. – Днепропетровск, 1957. – 237 с.

78. Тиранская, С.М. Влияние природы металла на механизм анодного растворения в полирующих электролитах и качество поверхности / С.М. Тиранская // Вопросы химии и химической технологии. – 1974. – Вып. 32. – С. 72–81.

79. Тиранская, С.М. Влияние термообработки на процесс полирования углеродистой стали / С.М. Тиранская, Б.Д. Токарь, В.П. Панина // Вопросы химии и химической технологии. – 1974. – Вып. 32. – С. 66–72.

80. Тиранская, С.М. Влияние степени холодной пластической деформации конструкционных сталей на электрохимическое полирование переменным током / С.М. Тиранская, С.И. Немчинов,

Ф.И. Рудаева // Химическая и электрохимическая обработка проката. – Днепропетровск. – 1974. – С. 170–172.

81. Немчинов, С.И. Электрохимическое полирование постоянным и переменным током холоднодеформированных конструкционных сталей: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.03 / С.И. Немчинов. – 1979. – 161 с.

82. Иващенко, Н.И. Электрохимическое полирование сталей, легированных кремнием и марганцем: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.03 / Н.И. Иващенко. – Днепропетровск, 1984. – 180 с.

83. Вдовенко, В.Г. Эффективность электрохимической обработки деталей / В.Г. Вдовенко. – Красноярск: Изд-во красноярского ун-та, 1991. – 158 с.

84. Мирзоев, Р.А. Электрохимическая обработка металлов. Анодные процессы: учеб. пособие / Р.А. Мирзоев. – Л.: ЛПИ, 1988. – 64 с.

85. Афанасьев, С.А. Электрохимическое полирование полуферритных сталей / С.А. Афанасьев // Защита металлов. – 1973. – Т. 9, № 5. – С. 615–619.

86. Волков, Ю.А. Особенности гидродинамического режима при электрохимической обработке металлов / Ю.А. Волков, И.И. Мороз // Электронная обработка материалов. – 1965. – № 5. – С. 14–18.

87. Hicking, A. The Rate-Determining State in the Anodic Dissolution of Metals Trans / A. Hicking, J.K. Higgins // Inst. Met. Finishing. – 1953. – 274 p.

88. Walton, H.F. The Anode Layer in the Electrolytic Polishing of Copper / H.F. Walton // J. Electrochem. Soc. – 1950. – No 11. – P. 219–224.

89. Faust, Ch. Electropolishing. The practical side / Ch. Faust // Metall Finishing. – 1982. – V. 80. – No 8. – P. 59–63.

90. Синькевич, Ю.В. Электроимпульсное полирование деталей из коррозионностойких и углеродистых конструкционных сталей: дис. ...канд. техн. наук: 05.03.01; 05.02.08 / Ю.В. Синькевич. – Минск, 1998. – 163 с.

91. Синькевич, Ю.В. Анодные эффекты в водных электролитах и их технологическое применение / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. материалов V Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 сент. 2010 г.: в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси;

редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. – Кн. 2. – С. 201–205.

92. Kellog, H.H. Anod effect in aqueous electrolyte / H.H. Kellog // J. of the Electrochemical Soc. – 1950. – No 4. – P. 133–142.

93. Мураc, В.С. Исследование возможности использования электролитного нагрева при волочении проволоки: дис. ... канд. техн. наук / В.С. Мураc. – Минск, 1951. – 165 с.

94. Коммутация тока на границе металл–электролит / Б.Р. Лазаренко [и др.]. – Кишинев: АН МССР, 1971. – 74 с.

95. Гюнтершульце, А. Электролитические конденсаторы / А. Гюнтершульце, Г. Бетц. – М.: Оборонгиз, 1938. – 200 с.

96. Дураджи, В.Н. Исследование и применение электрических разрядов при нагреве металлов в электролитах: дис... канд. техн. наук / В.Н. Дураджи. – Кишинев, 1973. – 171 с.

97. Факторович, А.А. Исследование и применении коммутации тока в электролитах: дис... канд. техн. наук / А.А. Факторович. – Кишинев, 1969. – 183 с.

98. Способ измерения давления газов: а. с. 171140 СССР, МПК G 01 / А.А. Факторович. – № 880315; заявл. 07.02.64; опубл. 11.05.65 // Открытия. Изобретения. – 1965. – № 10.

99. Датчик температуры: а. с. 248287 СССР, МПК G 01k / Б.Р. Лазаренко, А.А. Факторович, В.Н. Дураджи; ИПФ АН МССР. – № 1155531; заявл. 16.05.67; опубл. 10.07.69 // Открытия. Изобретения. – 1969. – № 23.

100. Факторович, А.А. Хемотронный прерыватель тока как датчик некоторых неэлектрических величин / А.А. Факторович // Электронная обработка материалов. – 1968. – № 5. – С. 25–28.

101. Электролитная очистка проволоки от окалины в коммутационном режиме / А.Я. Занин [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 4. – С. 85–87.

102. Электролитно-кавитационная очистка поверхности ленточного проката от минеральных смазок / В.И. Дунаевский [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1980. – № 6. – С. 52–54.

103. Исследование в промышленных условиях биполярной обработки полосового проката в режиме электролитной кавитации / А.Я. Занин [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1982. – № 2. – С. 29–32.

104. Разработка электролитного метода очистки и обезжиривания холоднокатанных полос / Ю.Д. Железнов [и др.] // Тонколистовая прокатка / Ю.Д. Железнов [и др.]. – Воронеж, 1977. – С. 28–31.

105. Электролитно-плазменная обработка поверхностей металлических и полупроводниковых материалов / И.С. Куликов [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 окт. 2007 г.: в 2 ч. / ФТИ НАН Беларуси; редкол. С.А. Астапчик [и др.]. – Минск, 2007. – Ч. 2. – С. 222–227.

106. Мурас, В.С. Некоторые элементы процесса электролитического нагрева / В.С. Мурас // Сборник трудов ФТИ АН БССР. – Минск, 1956. – Вып. 3. – С. 53–58.

107. Лазаренко, Б.Р. Вольтамперные характеристики электрического разряда между металлическим и электролитным электродами / Б.Р. Лазаренко, В.Н. Дураджи, А.А. Факторович // Электронная обработка материалов. – 1972. – № 3. – С. 29–33.

108. Дураджи, В.Н., Некоторые особенности нагрева металлов в электролитной плазме при анодном процессе / В.Н. Дураджи, И.В. Брянцев // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 1. – С. 45–48.

109. Дураджи, В.Н. Исследование эрозии анода при воздействии на него электролитной плазмы / В.Н. Дураджи, И.В. Брянцев, А.К. Товарков // Электронная обработка материалов. – 1978. – № 5. – С. 13–17.

110. Дураджи, В.Н. Распределение температуры при нагреве металлов электролитной плазмой / В.Н. Дураджи, И.В. Брянцев // Электронная обработка материалов. – 1978. – № 2. – С. 53–56.

111. Белкин, П.Н. Исследование процесса нагрева анода и поверхностного насыщения сталей азотом и углеродом в электролитной плазме: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.04 / П.Н. Белкин. – Кишинев, 1979. – 157 с.

112. Дураджи, В.Н. Нагрев металлов в электролитной плазме / В.Н. Дураджи, А.С. Парсаданян; под общ. ред. А.С. Парсаданяна. – Кишинев: Штиинца, 1988. – 216 с.

113. Белкин, П.Н. Стационарная температура анода, нагреваемого в водных электролитах / П.Н. Белкин, А.Б. Белихов // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Т. 75. – № 6. – С. 19–24.

114. Применение электролитного нагрева для термической обработки композиционных электрохимических покрытий / Л.М. Ягодкина [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1988. – № 2. – С. 37–39.

115. Фоминов, А.Я. Об аномальном изменении электросопротивления аустенитного сплава после электролитной обработки / А.Я. Фоминов, Б.М. Соколов // Известия ВУЗов СССР. Серия Черная металлургия. – 1980. – № 12. – С. 63–67.

116. Использование нагрева в электролите для диффузного упрочнения сталей / Л.С. Ляхович [и др.] // Новое в электрохимической размерной обработке металлов / Л.С. Ляхович [и др.]. – Кишинев, 1972. – С. 194–198.

117. Фоминов, А.Я. Применение электролитического нагрева для аустенизации проволоки из сплава 40 КНХМВТЮ / А.Я. Фоминов, Г.П. Андрейченко // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 1. – С. 67–69.

118. Фоминов, А.Я. Обработка меди с использованием электролитного нагрева / А.Я. Фоминов, В.Ф. Самодуров, А.Г. Ширяев // Электронная обработка материалов. – 1988. – № 1. – С. 22–26.

119. Занин, А.Я. Нагрев непрерывно движущегося круглого проката в электролитном плазмотроне / А.Я. Занин, Ю.И. Назаренко, М.И. Сердюк // Электронная обработка материалов. – 1984. – № 3. – С. 36–38.

120. Влияние поверхностно-активных веществ на анодный электролитный нагрев металла / Э. Реснер [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 4. – С. 59–61.

121. Скоростная термическая обработка круглого проката электролитно-плазменным способом / В.И. Дунаевский [и др.] // Труды ВНИИМЕТМАШ. – 1978. – № 56. – С. 90–98.

122. Лазаренко, Б.Р. Об особенностях электролитного нагрева при анодном процессе / Б.Р. Лазаренко [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1974. – № 3. – С. 37–40.

123. Реснер, Э. Износ электрода при обработке малоуглеродистой стали в электролитной плазме при анодном процессе / Э. Реснер [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 3. – С. 59–61.

124. Высокотемпературная коррозия малоуглеродистой стали в условиях электроплазменной обработки / В.А. Зайцев [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 5. – С. 56–58.

125. Verfahren zum Hochglänzen stromleitender Werkstücke im anodischen Elektrolyt plasma: patentschrift 238074 DDR, С 25 F 3/16 / Н. Hoyer, E. Rößner, K. Rabending, E. Kirsche, J. Pampel; VEB Forschungszentrum. – No 2771201; 07.06.85; 06.08.86.

126. Способ электрохимической обработки: а. с. 1314729 СССР, МКИ4 С 25 F 3/16 / В.К. Станишевский, А.Э. Паршутю, А.А. Кособуцкий; Белорус. политехн. ин-т. – № 3905831; заявл. 27.05.85. – ДСП.

127. Метод электроимпульсного полирования сталей и цветных металлов / В.Н. Чачин [и др.]. – Минск: БелНИИНТИ Госплана БССР, 1987. – 4 с. – (Информац. листок БелНИИНТИ Госплана БССР о науч.-техн. достиж. № 87–150).

128. Метод электроимпульсного полирования металлов / Е.Я. Головкина [и др.] // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов; 1988. – Вып. 13. – С. 40–43.

129. Электролит для плазменно-электролитного полирования изделий из алюминия и его сплавов: пат. 7291 Респ. Беларусь, МПК7 С 25F 3/20 / И.С. Куликов, А.Я. Каменев, В.Л. Ермаков, С.В. Ващенко, Л.А. Климова; заявитель гос. науч. учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси – № 20020425; заявл. 20.05.2002; опубл. 30.09.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2005.

130. Клубович, В.В. Исследование способов интенсификации электролитно-разрядной обработки ультразвуковыми воздействиями / В.В. Клубович, В.А. Томило, Е.В. Хрущев // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. трудов VI Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 24–26 апр. 2007 г.: в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк, 2007. – Т. 3. – С. 15–18.

131. Plasma-electrolytic polishing of metals products: pat. 2010/0200424 A 1 U.S., С 25 F 3/16 / А. Mayorov, А. Berkovich; А. Mayorov, А. Berkovich. – № 61/150881; 02.09.2009; pub. 08.12.2010 [Electronic resource]. – 2011. – Mode of access:

<http://www.faqs.org/patents/app/20100200424>. – Date of access: 22.04.2012.

132. Podhorský, Š. The possibilities of plasma polishing of the steel DIN 1.0570 in electrolyte / Š. Podhorský, A. Malík // METAL 2010: 19th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Rožnov pod Radhoštěm, Czech Republic, May 18th – 20th 2010 [Electronic resource]. – 2011. – Mode of access: <http://www.metal2011.com/en>. – Date of access: 22.04.2012.

133. Plasma-polishing – an innovative and ecological polishing process for metals / BECKMANN-INSTITUT für Technologieentwicklung e.V. [Electronic resource]. – 2011. – Mode of access: <http://www.plasma-polishing.eu/index1.htm>. – Date of access: 22.04.2012.

134. Plasma Polishing / Alliance Technologies [Electronic resource]. – 2012. – Mode of access: <http://en.the-alliance.eu/news.php>. – Date of access: 22.04.2012.

135. Electro Plasma Polishing Machine / HONEST (CHINA) Metal etching & Finishing machine Co., Ltd. [Electronic resource]. – 2012. – Mode of access: http://www.alibaba.com/product/aog15qob-108157137-0/Electro_Plasma_Polishing_Machine.html. – Date of access: 22.04.2012.

136. Innovative equipment and technology for electro-discharge polishing and oxidation / Central Laboratory of Applied Physics (CLAP) of Bulgarian Academy of Sciences [Electronic resource]. – 2010. – Mode of access: <http://www.researchvalue.net/repository/result.html?id=299>. – Date of access: 22.04.2012.

137. Способ электрохимической обработки металлических изделий, преимущественно из меди и медных сплавов, под гальванические покрытия: пат. 8424 Респ. Беларусь, МПК7 С 25F 3/16 / И.С. Куликов, А.Я. Каменев, В.Л. Ермаков, Л.А. Климова; Гос. науч. учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси – № 20031087; заявл. 25.11.2003; опубл. 30.08.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2006.

138. Способ финишной плазменно-электролитной полировки изделий, преимущественно из высокоуглеродистых сталей и сплавов цинка: пат. 8425 Респ. Беларусь, МПК7 С 25F 3/18, 3/24 / И.С. Куликов, А.Я. Каменев, В.Л. Ермаков, Л.А. Климова, Т.И. Ильянкова;

Гос. науч. учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси – № 20040170; заявл. 04.03.2004; опубл. 30.08.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2006.

139. Электролит для полирования изделий из титана и его сплавов: пат. 7570 Респ. Беларусь, МПК7 С 25F 3/16 / И.С. Куликов, А.Я. Каменев, Л.А. Климова; Гос. науч. учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси – № 20030199; заявл. 06.03.2003; опубл. 30.12.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2005.

140. Электролит для полирования в электрогидродинамическом режиме: а. с. 1785300 СССР, МКИ5 С25 А 3/22 / В.К. Станишевский, А.А. Баркатин, Г.Е. Слепнев, А.А. Кособуцкий, Л.М. Семеновко, В.А. Хлебцевич; Белорус. политехн. ин-т. – № 4719468; заявл. 13.07.89. – ДСП.

141. Раствор для полирования стальных изделий: а.с. 1515785 СССР, МКИ4 С25 F 3/16 / В.К. Станишевский, Г.Е. Слепнев, Л.М. Семеновко, А.Э. Паршутто, А.А. Кособуцкий; Белорус. политехн. ин-т. – № 4358303; заявл. 30.11.87. – ДСП.

142. Способ полирования изделий из хромоникелевых сталей: а. с. 1700110 СССР, МКИ5 С 25 F 3/16 / В.К. Станишевский, Л.М. Семеновко, В.Н. Тихоновский, А.А. Кособуцкий, А.Э. Паршутто, В.А. Хлебцевич, Л.С. Величко; Белорус. политехн. ин-т. – № 4131156; заявл. 03.07.86; опубл. 23.12.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 47.

143. Способ электролитно-плазменного полирования изделий сложной формы: а. с. 1775508 СССР, МКИ5 С 25 F 3/16 / В.К. Станишевский, Г.Е. Слепнев, Л.М. Семеновко, А.А. Кособуцкий, А.Э. Паршутто, В.А. Хлебцевич; Белорус. политехн. ин-т. – № 4313121; заявл. 15.10.87; опубл. 15.11.92 // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 42.

144. Способ полирования изделий: пат. 2116391 Рос. Федерация, МПК6 С 25 F 3/16 / Н.А. Амирханова, В.А. Белоногов, Р.Г. Касимов, В.Н. Горяйнов; Н.А. Амирханова, В.А. Белоногов, Р.Г. Касимов, В.Н. Горяйнов. – № 94014674; заявл. 19.04.094; опубл. 27.07.98 // Официальн. бюл. / Российское агентство по патентам и товарным знакам. – 1998. – № 21.

145. Способ электрохимического полирования металлических изделий: пат. 2168565 Рос. Федерация, МПК7 С 25 F 3/16 / Р.А. Мирзоев, М.И. Стыров, Н.И. Степанова, А.И. Майоров, Р.А. Мирзоев, М.И. Стыров, Н.И. Степанова, А.И. Майоров. – № 99127843; заявл. 30.12.99; опубл. 10.06.2001 // Официальн. бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности и, патентам и товарным знакам. – 2001.

146. Способ электролитно-плазменной обработки деталей: пат. 2357019 Рос. Федерация, МПК С 25 F 3/16 / А.М. Смыслов, М.К. Смыслова, А.Д. Мингажев, К.С. Селиванов, В.Ю. Гордеев, И.Н. Цыбулина, О.Н. Симин, А.С. Лисянский, Д.Р. Таминдаров; ООО. «НПП Уралавиаспецтехнология». – № 2007112558; заявл. 04.04.2007; опубл. 27.05.2009 // Официальн. бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности и, патентам и товарным знакам. – 2009.

147. Способ электролитно-плазменной обработки деталей: пат. 2355828 Рос. Федерация, МПК7 С 25 F 3/16 / А.М. Смыслов, М.К. Смыслова, А.Д. Мингажев, К.С. Селиванов, В.Ю. Гордеев, С.П. Павлинич; ООО. «НПП Уралавиаспецтехнология». – № 2007115768; заявл. 25.04.2007; опубл. 20.05.2009 // Официальн. бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности и, патентам и товарным знакам. – 2009.

148. Куликов, И.С. Особенности электроимпульсного полирования металлов в электролитной плазме / И.С. Куликов, С.В. Ващенко, В.И. Василевский // Вести НАН Беларуси. Физико-технические науки. – 1995. – № 4. – С. 93–98.

149. Хмыль, А.А. Влияние метода полирования стали на шероховатость и эксплуатационные свойства контактных поверхностей / А.А. Хмыль [и др.] // Трение и износ. – 1996. – Том 17. – № 4. – С. 491–496.

150. Веселовский, А.П. Особенности электролитно-плазменной обработки металлов в нетоксичных электролитах / А.П. Веселовский, Л.А. Ушомирская // Металлообработка. – 2001. – № 4. – С. 29–31.

151. Крылова, В.В. Состояние вопроса по электролитно-плазменному полированию / В.В. Крылова, Л.А. Ушомирская // XXXI Неделя науки СПбГПУ: матер. межвуз. науч. конф., СПб, 2003: в 3 частях. – СПб: СПбГПУ, 2003. – Ч. 3. – С. 111–112.

152. Особенности процессов размерной обработки металлических изделий электролитно-плазменным методом / Ю.Г. Алексеев [и др.] // Литье и металлургия. – 2005. – Вып. 36, № 4. – С. 188–195.

153. Разработать основы теории и технологии изготовления изделий медицинского назначения [текст]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. темы Ю.Г. Алексеев. – Минск, 2005. – 48 с. – № ГР 20041012.

154. Киселева, Н.А. Разработка высокоэффективных технологий металлообработки – вклад в инновационное развитие Республики Беларусь / Н.А. Киселева, Ю.В. Синькевич, С.И. Моисеенко // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов / БНТУ. – Минск, 2007. – Вып. 23. – С. 100–104.

155. Иващенко, С.А. Газотермические и вакуумно-плазменные покрытия со специальными физико-механическими свойствами / С.А. Иващенко, И.С. Фролов, Ж.А. Мрочек. – Минск: Технопринт, 2001. – 236 с.

156. Фролов, И.С. Упрочнение деталей мультислойными покрытиями в вакууме / И.С. Фролов, С.А. Иващенко, Ж.А. Мрочек // Машиностроение–2010: технологии – оборудование инструмент – качество: матер. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7–8 апр. 2010 г. / Бизнесофсет; редкол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2010. – С. 69–70.

157. Способ электрохимической обработки поверхности нержавеющей стали: а. с. 1618008 СССР, МКИ5 С 25 F 5/00 / В.К. Станишевский, А.А. Кособуцкий, Г.Е. Слепнев, А.В. Станишевский, Н.Я. Тапунов; Белорус. политех. ин-т. – № 4691234; заявл. 16.05.89. – ДСП.

158. Способ определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия: пат. 2119975 Рос. Федерация, МПК6 С 25 F 5/00 / Н.А. Амирханова, Р.Р. Невьянцева, Т.М. Тимергазина, Е.В. Парфенов; Уфимский гос. авиац. технич. ун-т. – № 96119097; заявл. 25.09.96; опубл. 10.10.98 // Официальн. бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 1998.

159. Способ определения наличия имплантированного слоя: пат. 2148811 Рос. Федерация, МПК7 G 01 N 13/00 / Н.А. Амирханова, А.М. Смыслова, Р.Р. Невьянцева, Т.М. Тимергазина, Н.Ф. Измайло-

ва, Е.В. Парфенов; Уфимский гос. авиац. технич. ун-т. – № 98115700; заявл. 17.08.98; опубл. 10.05.2000 // Официальн. бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2000.

160. Горбатков, С.А. Управление технологическим процессом электролитно-плазменного удаления покрытия / С.А. Горбатков, Е.В. Парфенов, Р.Р. Невьянцева // Вестник УГАТУ. – 2003. – Т. 4. – № 1. – С. 145–152.

161. Парфенов, Е.В. Обобщенная математическая модель технологического процесса электролитно-плазменного удаления покрытий / Парфенов, Р.Р. Невьянцева, А.А. Быбин // Вестник УГАТУ. – 2007. – Т. 9. – № 7. – С. 33–40.

162. Устройство для электрохимической обработки: а. с. 1302741 СССР, МКИ4 С 25 F 7/00 / А.В. Степаненко, В.К. Станишевский, А.Э. Паршутто, А.А. Кособуцкий, В.А. Хлебцевич; Белорус. политех. ин-т. – № 3940072; заявл. 29.07.85. – ДСП.

163. Способ удаления эмалевых покрытий с проводов: а. с. 1309857 МКИ4 Н 02 G 1/12 / В.К. Станишевский, А.Э. Паршутто, А.А. Семченко, А.А. Кособуцкий, В.А. Хлебцевич; Белорус. политех. ин-т. – № 3942315; заявл. 06.08.85. – ДСП.

164. Электролитно-плазменное полирование // ОДО «СТЕКЛЮ-ВАК» [Электронный ресурс]. – 2004. – Режим доступа: <http://finishing.narod.ru/>. – Дата доступа: 25.04.2012.

165. Электролитно-плазменная обработка изделий // ИРУП "Технопарк БНТУ "Политехник" [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.epo.metolit.by/ru/>. – Дата доступа: 25.04.2012.

166. Warning, W. Luminescence during the anodic oxidation of silicon / W. Warning, E.A. Benjamini // J. Electrochem. Soc. – 1964. – V. 111. – № 11. – P. 1256–1265.

167. Hickling, A. Contact glow discharge electrolysis / A. Hickling, M.D. Ingram // Trans. Faraday Soc. – 1964. – V. 60. – No 496. – pt 4. – P. 785–793.

168. Петров, Г.П. Исследование разряда с жидким катодом / Г.П. Петров, Ф.А. Сальянов // Труды Казанского авиац. ин-та. – 1974. – Вып. 173. – С. 11–15.

169. Баковец, В.В. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / В.В. Баковец, О.В. Поляков, И.П. Долговесова. – Новосибирск: Наука. Сибирское отд., 1991. – 168 с.

170. Аверьянов, Е.Е. Плазменное анодирование в радиоэлектронике / Е.Е. Аверьянов. – М.: Радио и связь. – 1983. – 78 с.

171. Николаев, А.В. Новое явление в электролизе / А.В. Николаев, Г.А. Марков, В.И. Пещевский // Известия СО АН СССР. Серия химических наук. – 1977. – № 12. – Вып. 5. – С. 32–33.

172. Томашов, Н.Д. Исследование анодного окисления циркония, тантала, титана и алюминия / Н.Д. Томашов, Ф.П. Заливалов // Журнал прикладной химии. – 1970. – Т. 63. – Вып. 11. – С. 2474–2479.

173. Способ электролитического оксидирования вентиляльных металлов и их сплавов: пат. 2283901 Рос. Федерация, МПК С 25 D 11/02 / П.С. Гордиенко, О.С. Василенко, Е.С. Панин, С.Б. Буланова, Д.В. Доставалов, С.В. Коркош, А.Д. Жирков; Ин-т химии ДВО РАН. – № 2005114200; заявл. 11.05.2005; опубли. 20. 09. 2006 // Официальн. бюл. / Федеральная служба по интеллект. собственности и, патентам и товарным знакам. – 1998. – № 26.

174. Алехин, В.Ф. Влияние химического состава электролита на кинетику роста керамического слоя при анодном микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов / В.Ф. Алехин, Е.В. Звонарев, Н.М. Чиргинова // Материалы, технологии, инструменты. – 1997. – № 4. – С. 89–92.

175. Борбат, В.Ф. Физико-химическая модель процессов в анодном микроразряде / В.Ф. Борбат, О.А. Голованова, А.М. Сизиков // Вестник ОмГУ. – 1998. – Вып. 1. – С. 35–37.

176. McNeil, W. Anodic film growth by anion deposition and phosphate solutions / W. McNeil, L.L. Gruss // J. Electrochem. Soc. – 1963. – V. 1. – No 8. – P. 853–855.

177. Артемов, А.В. Получение наноразмерных металлов электрическим разрядом в жидкости / А.В. Артемов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. – 2008. – № 4. – С. 150–154.

178. Рябков, В.М. Плазменная обработка металлических изделий в электролитах (ТЕР–технология) / В.М. Рябков, Д.В. Рябков // Технология машиностроения. – 2000. – № 1. – С. 29–34.

179. Рябков, В.М. Процессы самоорганизации в формировании наноструктурного слоя чистого железа (Fe) при модификации поверхности стального проката электролитно-плазменной нанотехнологией / В.М. Рябков, Д.В. Рябков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2008. – № 4. – С. 39–43.

180. Нуриев, И.М. Характеристики многоканального разряда между проточным электролитическим катодом и металлическим анодом при атмосферном давлении: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 01.02.05 / И.М. Нуриев; Казанский гос. технич. ун-т им. А.Н. Туполева. – Казань, 2005. – 17 с.

181. Гайсин, А.Ф. Струйный многоканальный разряд между твердым и электролитическим электродами в процессах модификации материалов при атмосферном давлении: автореф. дис. ...докт. техн. наук: 01.02.05 / А.Ф. Гайсин; Казанский гос. технич. ун-т им. А.Н. Туполева. – Казань, 2007. – 35 с.

182. Ахатов, М.Ф. Многоканальный разряд между струйным электролитическим катодом и твердым анодом при атмосферном давлении: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 01.02.05 / М.Ф. Ахатов; Казанский гос. технич. ун-т им. А.Н. Туполева. – Казань, 2008. – 19 с.

183. Багаутдинова, Л.Н. Многоканальный и аномальный тлеющий разряды с металлическим анодом, входящим в электролитический катод: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 01.02.05 / Л.Н. Багаутдинова; Казанский национальн. исслед. технич. ун-т им. А.Н. Туполева-КАИ. – Казань, 2012. – 20 с.

184. Титова, Ю.В. Физико-химические закономерности инициирования окислительных процессов в растворах электролитов стационарным и скользящим разрядами: автореф. дис. ...канд. хим. наук: 02.00.04 / Ю.В. Титова; Ин-т химии растворов РАН. – Иваново, 1999. – 16 с.

185. Гецина, М.Л. Источники атомизации и возбуждения на основе разрядов с электролитным катодом для определения некоторых металлов в растворах: автореф. дис. ...канд. хим. наук: 02.00.02 / М.Л. Гецина; Ин-т геохимии и аналит. химии им. В.И. Вернадского РАН. – 2005. – 25 с.

186. Поляков, О.В. Влияние минерализации раствора на разложение его компонентов в условиях разрядного электрорадиолиза / О.В. Поляков, А.М. Бадалян, Л.Ф. Бахтурова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2005. – Т. 13. – С. 633–639.

187. Захаров, А.Г. Физико-химические свойства плазменно-растворных систем и возможности их технологических применений / А.Г. Захаров, А.И. Максимов, Ю.В. Титова // Успехи химии. – 2007. – 76(3). – С. 260–277.

188. Ягов, В.В. Влияние состава фонового электролита на интенсивность линий металлов в электрических разрядах с жидким электролитным катодом / В.В. Ягов, М.Л. Гецина // Журнал аналитической химии. – 2004. – Т. 59. – № 1. – С. 73–79.

189. Кузьмичева, Л.А. Плазмоиницируемые окислительно-восстановительные процессы в растворах неорганических электролитов: автореф. дис. ...канд. хим. наук: 02.00.04 / Л.А. Кузьмичева; Ин-т химии растворов РАН. – Иваново, 2005. – 19 с.

190. Словецкий, Д.И. Параметры электрического разряда в электролитах и физико-химические процессы в электролитной плазме / Д.И. Словецкий, С.Д. Терентьев // Химия высоких энергий. – 2003. – Т. 37. – № 5. – С. 355–361.

191. Максимов, А.И. Излучение тлеющего разряда с электролитным катодом и процессы переноса нейтральных и заряженных частиц из раствора в плазму / А.И. Максимов, В.А. Титов, А.В. Хлюстова // Химия высоких энергий. – 2004. – Т. 38. – № 3. – С. 227–230.

192. Ретер, Г. Электронные лавины и пробой в газах: пер. с англ. под ред. В.С. Комелькова / Г. Ретер. – М.: Мир, 1968. – 390 с.

193. Райзер, Ю.П. Основы газоразрядных процессов / Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1980. – 416 с.

194. Sternberg, Z. Gas discharges / Z. Sternberg // Intern. Conf., London, 1970 / Inst. Elec. Eng.. – London, 1970. – P. 68–71.

195. Hicling, A. Electrochemical processes in glow discharge at the gas solution interface / A. Hicling // Modern aspects of electrochemistry / A. Hicling / . – London: Butterworth, 1971. – No 6. – P. 329–373.

196. Поляков, О.В. Полуэмпирическая оценка сечений и эффективности образования геминальных пар в воде медленными протонами / О.В. Поляков // Электронный журнал «Исследовано в России» [Электронный ресурс]. – 2001. – № 143. – С. 1632 – 1641. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articlts/2001/143/pdf>. – Дата доступа: 4.05.2010.

197. Goodman, J. The Yield of Hydrated Electrons in Glow-Discharge Electrolysis / J. Goodman, A. Hicling, B. Schofield // J. Electroanal. Chem.. – 1973. – Vol. 48. – № 2. – P. 319–323.

198. Поляков, О.В. Выходы радикальных продуктов разложения воды при разрядах с электролитными электродами / О.В. Поляков, А.М. Бадалян, Л.Ф. Бахтурова // Химия высоких энергий. – 2003. – Т. 37. – № 5. – С. 367–372.

199. Поляков, О.В. Роль концентрации электролита при разложении воды и генерации электронов в условиях анодных микропорядов / О.В. Поляков, А.М. Бадалян, Л.Ф. Бахтурова // Химия высоких энергий. – 2005. – Т. 39. – № 2. – С. 140–142.

200. Белкин, П.Н. Исследование проводимости паровой пленки при анодном электролитном нагреве / П.Н. Белкин, В.И. Ганчар, Ю.Н. Петров // Доклады академии наук СССР. – 1986. – Т. 291. – № 5. – С. 1116–1119.

201. Белкин, П.Н. Стационарная температура анода, нагреваемого в водных электролитах / П.Н. Белкин, А.Б. Белихов // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Т. 75. – № 6. – С. 19–24.

202. Словецкий, Д.И. Механизм плазменно-электролитного нагрева металлов / Д.И. Словецкий, С.Д. Терентьев, В.Г. Плеханов // Теплофизика высоких температур. – 1986. – Т. 24. – № 2. – С. 353–363.

203. Ширяева, С.О. О некоторых особенностях появления ионов вблизи заряженной поверхности интенсивно испаряющегося электролита / С.О. Ширяева, А.И. Григорьев, В.В. Морозов // Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73. – Вып. 7. – С. 21–27.

204. Григорьев, А.И. О переносе энергии и формировании электрического тока в окрестности опущенного в электролит, сильно нагретого протекающим током электрода / А.И. Григорьев // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74. – Вып. 5. – С. 38–43.

205. Куликов, И.С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И.С. Куликов, С.В. Ващенко, А.Я. Каменев. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 232 с.

206. Новиков, В.И. Повышение эффективности изготовления сложнопрофильных деталей из легированных сталей методом электролитно-плазменного полирования: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.02.07 / В.И. Новиков; СПб гос. политехн. ун-т. – СПб, 2010. – 19 с.

207. Провести экспериментально-теоретические исследования влияния емкостно-индуктивных устройств и фильтрующих экранов на стабилизацию процессов ЭПО и ресурс электролитов: отчет о НИР (заключ.) / Белорус. гос. политехн. академия; науч. рук. В.Н. Страх. – Минск, 1996. – 24 с. – № ГР 1996850.

208. Капцов, Н.А. Электрические явления в газах и вакууме / Н.А. Капцов. – М.: Огиз, 1947. – 808 с.

209. Поляков, О.В. Плотность тока и перенос заряда на межфазной границе тлеющий разряд – электролитный катод / О.В. Поляков // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2003. – Т. 5. – № 1. – С. 102–105.

210. Поляков, О.В. Эмиссия электронов и самоподдержание разряда в условиях водного электролитного катода / О.В. Поляков, А.М. Бадалян, Л.Ф. Бахтурова [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www.chemphys.edu.ru/media/files/2007-01-16-001.pdf>. – Дата доступа: 4.05.2010.

211. Гайсин, А.Ф. Основные физико-химические процессы в плазменно-электролитных разрядах / А.Ф. Гайсин, Р.Н. Кашапов [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: <http://www.isuct.ru/istapc2008/PROC/1-10.pdf>. – Дата доступа: 10.05.2010.

212. Хлюстова, А.В. Коэффициенты эмиссии электронов из растворов электролита / А.В. Хлюстова, А.И. Максимов, В.А. Титов // ISTAPC-2002: матер. Междунар. симпоз. по теорет. и прикл. плазмохимии «ISTAPC-2002», Плёт, Россия, 2002 г. – Плёт, 2002. – Т. 1. – С. 106–107.

213. Поляков, О.В. Перенос энергии и заряда на межфазной границе газоразрядная плазма – электролитный катод / О.В. Поляков, А.М. Бадалян, Л.Ф. Бахтурова [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: <http://www.isuct.ru/istapc2008/PROC/1-36.pdf>. – Дата доступа: 10.05.2010.

214. Поляков, О.В. Анионный перенос отрицательного заряда из электролитного катода в газоразрядную плазму / О.В. Поляков, А.М. Бадалян, Л.Ф. Бахтурова // Электронный журнал «Исследовано в России» [Электронный ресурс]. – 2004. – № 222. – С. 2352 – 2361. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articlts/2004/222/pdf>. – Дата доступа: 10.08.2010.

215. Измерение плотности плазмы в пространственно распределенном электрическом разряде в жидкой среде / Е.И. Скибенко [и др.] // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76. – Вып. 9. – С. 133–135.

216. Григорьев, А.И. Механизм развития неустойчивости заряженной поверхности жидкости / А.И. Григорьев, О.А. Григорьев, С.О. Ширяева // Журнал технической физики. – 1992. – Т. 62. – Вып. 9. – С. 13–21.

217. Григорьев, А.И. О формировании и диспергировании пленки электролита на оплавляющемся в результате джоулева тепловыделения ледяном электроде / А.И. Григорьев, В.В. Морозов, С.О. Ширяева // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72. – Вып. 10. – С. 33–40.

218. Дураджи, В.Н. Экспериментальное исследование канала искрового разряда между металлическим и электролитным электродами / В.Н. Дураджи, А.А. Факторович // Электронная обработка материалов. – 1971. – № 2. – С. 44–46.

219. Фиргер, И.В. Термическая обработка сплавов / И.В. Фиргер. – Л.: Машиностроение, 1982. – 304 с.

220. Исследование пробоя между металлическим и электролитным электродами / Б.Р. Лазаренко [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1970. – № 4. – С. 18–21.

221. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т. / И.В. Суминов [и др.]; под общ. ред. И.В. Суминова. – М.: Техносфера, 2011. – Т. 1. – 464 с.

222. Янковский, И.Н. Электроимпульсное полирование коррозионно-стойких и углеродистых конструкционных сталей с обеспечением заданного комплекса свойств обрабатываемых поверхностей: дис. ...канд. техн. наук: 05.03.01 / И.Н. Янковский. – Минск, 2008. – 187 с.

223. Исследование физико-химических процессов на границе электролит-металл в условиях мощных электрических полей и знакопеременных гидродинамических потоков и создание процессов формирования и обработки поверхностей металлических изделий сложной конфигурации: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. темы А.А. Кособуцкий. – Минск, 2008. – 109 с. - № ГР 20062292.

224. Ганчар, В.И. Анодное растворение железа в процессе электролитного нагрева / В.И. Ганчар, И.М. Згардан, А.И. Дикусар // Электронная обработка материалов. – 1994. – № 4. – С. 56–61.

225. Авсеевич, О.И. Расчет толщины парогазовой оболочки при электроимпульсном полировании металлов / О.И. Авсеевич [и др.] // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов / Вышэйшая школа. – Минск, 1989. – Вып. 14. – С. 68–71.

226. Способ электрообработки: а. с. 1425972 СССР, МКИ4 В 23 Н 9/14 / В.Н. Чачин, А.Э. Паршутто, Г.М. Кухаренок, Д.М. Пинский,

В.А. Хлебцевич, В.И. Кудашов; Белорус. политех. ин-т. – № 4098835; заявл. 25.07.86. – ДСП.

227. Словецкий, Д.И. Электрический разряд в электролитах – источник неравновесной плазмы при атмосферном давлении / Д.И. Словецкий, С.Д. Терентьев [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: <http://www.isuct.ru/istapc2005/proc/5-23.pdf>. – Дата доступа: 19.08.2010.

228. Раствор для полирования металлических поверхностей: пат. 1132 Респ. Беларусь, МПК5 С 25 F 3/16 / Л.С. Житкевич, А.А. Кособуцкий, Н.В. Овчинникова; Белорус. гос. политех. академ. – № 1110 А; заявл. 29.12.93; опубл. 14.06.96 // Официальн. бюл. / Гос. патент. вед. Респ. Беларусь. – 1996.

229. Разработка технологического процесса и внедрение опытной установки электролитно-плазменной обработки изделий КН–4,5 М: отчет о НИР (заключ.) / Белорус. политехн. ин-т; рук. темы В.К. Станишевский. – Минск, 1990. – 46 с. – № ГР 01.89.0056 445.

230. Способ электроимпульсной обработки металлических деталей: пат. 2186662 РФ, МПК7 В 23 Н 5/02, 5/12, С 25 F 3/24 / Е.И. Ботов; заявитель Е.И. Ботов – № 99118730; заявл. 27.08.1999; опубл. 10.08.2002 // Официальн. бюл. / Российское агентство по патентам и товарным знакам. – 2002. – № 22.

231. Исаевич, Л.А. Исследование процесса получения высокопрочной проволоки из стали 12Х18Н10Т волочением с электролитно-плазменной обработкой поверхности / Л.А. Исаевич, Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королев // Вестник БНТУ. – 2005. – № 6. – С. 30–33.

232. Автоматизированный комплекс электроимпульсного полирования деталей: пат. 2049163 РФ, МПК6 С 25 F 3/16 / Л.Г. Одинцов, А.К. Куценко, Э.Т. Зеликов, В.Н. Дзегиленок, Е.Н. Коваленок, Ю.И. Боровко; заявитель Л.Г. Одинцов. – № 93004361/26; заявл. 01.02.93; опубл. 27.11.95 // Официальн. бюл. / Комитет РФ по патентам и товарным знакам. – 1995. – № 33.

233. Синькевич, Ю.В. Влияние электролитной анодной обработки на удельный съем и микротвердость поверхности сталей / Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина, С.Н. Терехов // Интенсификация и автоматизация отделочно-зачистной обработки деталей машин: тез. докл. науч.-технич. конф., Ростов н/Д, 1988 г. / Ростовский ин-т сельскохоз. машиностр.; редкол.: А.П. Бабичев [и др.]. – Ростов н/Д, 1988. – С. 65–67.

234. Разработать основы теории и технологии изготовления изделий медицинского назначения [текст]: отчет о НИР / БНТУ; рук. темы Ю.Г. Алексеев. – Минск, 2004. – 43 с. – № ГР 20041012.

235. Исследовать и разработать технологию электрополировки прецизионных поверхностей пресформ для изготовления светотехнических и электротехнических изделий с целью импортозамещения [текст]: отчет о НИР (заключ.) / БГПА; рук. темы Ю.Г. Алексеев. – Минск, 2001. – 37 с. – № ГР 20001591.

236. Головкина, Е.Я. Исследование параметров шероховатости поверхности стальных деталей после электроимпульсного полирования и нанесения тонкопленочных покрытий / Е.Я. Головкина [и др.] // Известия ВУЗов СССР. Серия Машиностроение. – 1989. – № 6. – С. 134–138.

237. Семченко, Н.И. Коррозионное поведение аустенитных нержавеющей сталей после электролитно-плазменного полирования / Н.И. Семченко, А.Ю. Королев [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: <http://www.isuct.ru/istapc2008/PROC/4-18.pdf>. – Дата доступа: 21.01.2010.

238. Алексеев, Ю.Г. Комплексная технология изготовления изделий медицинской техники, основанная на пластическом деформировании и физико-технических методах / Ю.Г. Алексеев, В.Н. Страх, А.Ю. Королев // Литье и металлургия. – 2005. – № 4. – С. 180–187.

239. Ильющенко, А.Ф. Исследование влияния электролитно-плазменной обработки на шероховатость, морфологию поверхности, микротвердость и структурно-фазовое состояние низкоуглеродистых сталей и титановых сплавов / А.Ф. Ильющенко [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: матер. докл. 9-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 29–30 сент. 2010 г. / Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ; редкол. А.Ф. Ильющенко, В.В. Савич. – Минск, 2010. – С. 208–210.

240. Фомихина, И.В. Исследование влияния равномерности полировки различных зон сложной поверхности изделия в зависимости от глубины погружения, пространственной ориентации и скорости гидротоков при электролитно-плазменной обработке / И.В. Фомихина [и др.] // Сварка и родственные технологии: респ.

межвед. сб. науч. трудов / Ин-т порошковой металлург.; ред. кол. М.А. Андреев [и др.]. – Минск, 2008. – Вып. № 10. – С. 37–42.

241. Способ электролитно-плазменной обработки длинномерных изделий и устройство для его осуществления: а. с. 1615241 СССР, МКИ5 С 25 F 7/00, С 25 D 7/06 / В.К. Станишевский, А.А. Кособуцкий, А.Э. Паршутто, В.А. Хлебцевич, И.И. Матюшевский, Б.Г. Левин; Беларус. политех. ин-т. – № 4611410; заявл. 01.12.88; опубл. 23.12.90 // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 47.

242. Авсеевич, О.И. Электрогидродинамическая модель прианодной зоны при электроимпульсном полировании металлов / О.И. Авсеевич [и др.]; Беларус. политех. ин-т. – М., 1988. – 14 с. – Деп. в ВНИИТЭМР, № 295–мш88 // Библ. указ. ВИНТИ: Деп. науч. работы. – 1988. – № 11(205). – С. 140.

243. Устройство для электролитно-плазменной обработки изделий сложной формы: а. с. 1457461 СССР, МКИ4 С25 F 7/00 / В.К. Станишевский, А.А. Кособуцкий, С.С. Малявко, Л.М. Семеновко, А.Э. Паршутто, В.А. Хлебцевич, С.В. Логинов; Беларус. политех. ин-т. – № 4207709; заявл. 18.03.87. – ДСП.

244. Устройство для полирования полых металлических изделий: пат. 984 Респ. Беларусь, МПК7 С 25 F 7/00 / С.В. Ващенко, И.С. Куликов, А.М. Дергай, В.И. Василевский, В.Л. Ермаков, Л.Г. Лукашевич; Ин-т проблем энергетики Академии наук Беларуси. – № 236 А; заявл. 06.04.93; опубл. 15.12.1995 // Афіцыйны бюл. / Нац. Центр інтэлектуал. уласнасці. – 1995. – № 4. – Ч 1.

245. Устройство для электролитно-плазменной обработки изделий сложной формы: а. с. 1659534 СССР, МКИ5 С 25 F 7/00 / В.К. Станишевский, А.А. Кособуцкий, Н.Я. Тапунов, В.Е. Владюк, П.Ф. Андрищенко, В.А. Цытик; Беларус. политех. ин-т. – № 4719467; заявл. 13.07.89; опубл. 30.06.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 24.

246. Способ электролитно-плазменного изделий сложной формы: а. с. 1775508 СССР, МКИ5 С25 А 3/16 / В.К. Станишевский, А.А. Кособуцкий, Г.Е. Слепнев, Л.М. Семеновко, А.Э. Паршутто, В.А. Хлебцевич; Беларус. политех. ин-т. – № 4313121; заявл. 15.10.87; опубл. 15.11.92 // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 42.

247. Физико-механические свойства и электрополирующие процессы в материалах, находящихся в мощных электростатических и электромагнитных полях [текст]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ;

рук. темы А.А. Кособуцкий. – Минск, 2004. – 61 с. – № ГР 20022618.

248. Способ электрохимического полирования изделий из хромоникелевых сталей: пат. 2118412 РФ, МПК6 С 25 F 3/24 / А.С. Ставышенко, С.В. Скифский, П.Е. Наук; заявитель Тюменский гос. нефтегаз. ун-т. – № 97106310; заявл. 24.04.97; опубл. 27.08.98 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 1998.

249. Изготовить опытно-промышленный образец исследовательской установки по электролитно-плазменной обработке материалов [текст]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. темы А.А. Кособуцкий. – Минск, 2004. – 25 с. – № ГР 20043544.

250. Cionea, C. D. Microstructural evolution of surface layers during electrolytic plasma processing / C. D. Cionea. – The University of Texas at Arlington: Cristian Cionea. – 2010. – 137 p.

251. H. Dagnall, M.A. Exploring surface texture / M.A. H. Dagnall. – LEICESTER, ENGLAND: RANK TAYLOR HOBSON, 1980. – 170 p.

252. Синькевич, Ю.В. Исследование самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите в режиме электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 66–72.

253. Собственные радиоизлучение и ток электрического разряда как инструмент контроля и управления процессом электроимпульсного полирования / Г.Н. Здор [и др.] // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2009. – № 2. – С. 111–119.

254. Исследование собственного радиоизлучения и тока электрического разряда в электролите при анодной обработке нержавеющей стали / Г.Н. Здор [и др.] // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. трудов VII Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 апр. 2009 г.: в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк, 2009. – Т. 3. – С. 9–13.

255. Янковский, И.Н. Осциллографические исследования электрического тока в парогазовой оболочке при анодном процессе / И.Н. Янковский, Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. трудов VII Междунар. науч.-техн. конф.,

Новополоцк, 29–30 апр. 2009 г.: в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк, 2009. – Т. 3. – С. 13–17.

256. Исследование собственного радиоизлучения и тока электрического разряда при анодном процессе в режиме электроимпульсного полирования / Г.Н. Здор [и др.] // Перспективные материалы и технологии: сб. тез. Междунар. симпоз., Витебск, 25–29 мая 2009 г. / Витебский гос. технол. ун-т; гл. ред. В.В. Рубаник. – Витебск, 2009. – С. 223.

257. Синькевич, Ю.В. Исследование механизма прохождения электрического тока через парогазовую оболочку при анодном процессе / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. трудов / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2011. – Вып. 41. – С. 287–292.

258. Синькевич, Ю.В. Физико-математическая модель процесса электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. трудов / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2006. – Вып. 32. – С. 206–212.

259. Аксенович, О.Д. Методика и устройство для исследования парогазовой оболочки / О.Д. Аксенович, Ю.В. Синькевич, С.И. Романчук // Механика, кибернетика: тез. докл. XXXIII межресп. студенч. науч.-техн. конф. ВУЗов прибалт. рес.-к, Белорусской ССР и Молдавской ССР, Минск, 11–13 апр. 1989 г.: в 3 ч. / Белорус. политех. ин-т. – Минск, 1989. – Ч. 3. – С. 111.

260. Головкина, Е.Я. Устройство для исследования парогазовой оболочки при электроимпульсном полировании / Е.Я. Головкина, Ю.В. Синькевич, С.И. Романчук // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов / Вышэйшая школа. – Минск, 1990. – Вып. 15. – С. 60–63.

261. Устройство для измерения толщины парогазовой оболочки: а. с. 1744437 СССР, МКИ5 G 01 B 7/06 / Ю.В. Синькевич, С.И. Романчук, Е.Я. Головкина, О.Д. Аксенович; Белорус. политехн. ин-т. – № 4670167; заявл. 30.03.89; опубл. 30.06.92 // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 24.

262. Ваграмян, А.Т. Распределение тока на поверхности электродов при электроосаждении металлов / А.Т. Ваграмян, Т.Б. Ильина-Какуева. – М.: Металлургиядат, 1956. – 66 с.

263. Кудрявцев, Н.Т. Электролитические покрытия металлами / Н.Т. Кудрявцев. – М.: Химия, 1979. – 352 с.

264. Синькевич, Ю.В. Рассеивающая способность процесса электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Республ. науч.-техн. конф., Могилев, 27 янв. 2005 г. / Белорусско-российский ун-т; редкол.: И.С. Сазанов [и др.]. – Могилев, 2005. – С. 82.

265. Точность обработки при электроимпульсном полировании / Ю.В. Синькевич [и др.] // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов: в 2 т. / БНТУ. – Минск, 2005. – Вып. 21. – Т. 1. – С. 328–334.

266. Синькевич, Ю.В. Обеспечение точности обработки при электроимпульсном полировании / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. трудов / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2007. – Вып. 33. – С. 253–259.

267. Грилихес, С.Я. Электрохимическое полирование / С.Я. Грилихес. – Л.: Машиностроение, 1976. – 208 с.

268. Скорчеллетти, В.В. Теоретическая электрохимия / В.В. Скорчеллетти. – Л.: Химия, 1970. – 608 с.

269. Шероховатость поверхности. Термины и определения: ГОСТ 25142–82 (СТ СЭВ 1156–78). – Введ. 18.02.1982. – М.: Государств. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1982. – 20 с.

270. Беляев, Г.Я. Основные направления совершенствования технологии электроимпульсного полирования коррозионностойких сталей / Г.Я. Беляев, Ю.В. Синькевич // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов. Минск, Технопринт. 2000. – Вып. 16. – С. 156–159.

271. Синькевич, Ю.В. Обеспечение геометрических параметров качества поверхности электроимпульсным полированием / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. трудов / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2006. – Вып. 32. – С. 200–206.

272. Синькевич, Ю.В. Исследование микропрофиля поверхности деталей из углеродистой конструкционной стали при электроимпульсном полировании / Ю.В. Синькевич [и др.] // Машиностроение

ние: респ. межвед. сб. науч. трудов / БНТУ. – Минск, 2007. – Вып. 22. – С. 12–18.

273. Формирование микрогеометрии поверхности при электроимпульсном полировании / В.К. Шелег, Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. – 2007. – № 8. – С. 48–52.

274. Шелег, В.К. Исследование высотных параметров шероховатости поверхности коррозионно-стойких сталей при электроимпульсном полировании / В.К. Шелег [и др.] // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов: в 2 т. / БНТУ. – Минск, 2009. – Вып. 24. – Т. 1. – С. 18–21.

275. Синькевич, Ю.В. Механизм формирования микропрофиля поверхности при электроимпульсном полировании / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации и модернизации машин: сб. научн. трудов VI Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 24–26 апр. 2007 г.: в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк, 2007. – Т. 2. – С. 135–139.

276. Шелег, В.К. Моделирование топографии электроимпульсно полированной поверхности стали / В.К. Шелег, Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. материалов III Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 окт. 2008 г.: в 4 кн. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2008. – Кн. 2. – С. 14–20.

277. Янковский, И.Н. Исследование блеска поверхности сталей после электроимпульсного полирования / И.Н. Янковский, Ю.В. Синькевич // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тез. докл. Междун. науч.-техн. конф., Минск, 12–13 апреля 2011 г. / Бизнесофсет; редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2011. – С. 188–190.

278. Хусу, А.П. Шероховатость поверхностей: теоретико-вероятностный подход / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов; под ред. А.А. Первозванского. – М.: Наука, 1975. – 344 с.

279. Смирнов, Н.В. Краткий курс математической статистики для технических приложений / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – М.: Физматгиз, 1959. – 436 с.

280. Витенберг, Ю.Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки / Ю.Р. Витенберг. – Л.: Судостроение, 1971. – 101 с.

281. Беляев, Г.С. Расчет и построение коррелограмм уплотняющих поверхностей деталей судовой арматуры / Г.С. Беляев [и др.] // Судостроение. – 1971. – № 6. – С. 46–49.

282. Синькевич, Ю.В. Исследование механизма формирования топографии поверхности в процессе электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, А.А. Гриневич, И.Н. Янковский // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 35-летию машиностроит. фак. ПГУ, Новополоцк, 19–20 октября 2011 г. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2011. – С. 67–70.

283. Синькевич, Ю.В. Вероятностно-статистическая оценка шероховатости поверхности электроимпульсно полированных деталей / Ю.В. Синькевич, А.А. Гриневич, И.Н. Янковский // Вестник БНТУ. – 2011. – № 5. – С. 9–18

284. Ануфриев, И.Е. MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

285. Витенберг, Ю.Р. Оценка шероховатости с помощью корреляционных функций / Ю.Р. Витенберг // Вестник машиностроения. – 1969. – № 1. – С. 55–57.

286. Иванова, Н.П. Исследование морфологии и химического состава электроимпульсно полированной поверхности конструкционных углеродистых и коррозионностойких сталей / Н.П. Иванова [и др.] // Наука и техника. – 2012. – № 6. – С 3–10.

287. Беляев, Г.Я. Влияние электроимпульсного полирования на химический состав поверхности коррозионностойких сталей / Г.Я. Беляев, Ю.В. Синькевич // Наука и технологии на рубеже XXI века: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2000 г. / Технопринт; под ред. И.П. Филонова, Е.П. Сапелкина, Г.Я. Беляева. – Минск, 2000. – С. 26–30.

288. Синькевич, Ю.В. Формирование качества поверхности при электроимпульсном полировании коррозионностойких сталей / Ю.В. Синькевич // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. трудов / Донецкий гос. техн. ун.-т. – Донецк, 2001. – Вып. 17. С. 231–236.

289. Нефедов, В.И. Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений. Справочник / В.И. Нефедов. – М.: Химия, 1984. – 256 с.

290. Зигбан, К. Электронная спектроскопия: перевод с английского / К. Зигбан [и др.]; под ред. И.Б. Борового. – М.: Мир, 1971. – 493 с.

291. Синькевич, Ю.В. Влияние электроимпульсного полирования на структуру поверхности коррозионностойких сталей / Ю.В. Синькевич // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XIV Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 17–22 сент. 2007 г.: в 5 т. / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2007. – Т. 3. – С. 272–276.

292. Синькевич, Ю.В. Фазовый состав и микроструктура электроимпульсно полированной поверхности коррозионностойких сталей / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. трудов / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2009. – Вып. 37. – С. 233–238.

293. Синькевич, Ю.В. Влияние электроимпульсного полирования на микротвердость поверхности стали / Ю.В. Синькевич // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 35-летию машиностроит. фак. ПГУ, Новополоцк, 19–20 октября 2011 г. / Полоцкий гос. ун.-т; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2011. – С. 70–73.

294. Фокин, М.Н. Методы коррозионных испытаний металлов / М.Н. Фокин, К.А. Жигалова. – М.: Металлургия, 1986. – 80 с.

295. Синькевич, Ю.В. Исследование коррозионной стойкости сталей после электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, Н.П. Иванова, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. трудов / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2007. – Вып. 34. – С. 211–215.

296. Синькевич, Ю.В. Использование технологии электроимпульсного полирования в производстве высокотехнологичных изделий / Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов / Технопринт. – Минск, 2001. – Вып. 17. – С. 144–147.

297. Синькевич, Ю.В. Влияние электроимпульсного полирования подложки на прочность сцепления гальванических покрытий / Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. трудов / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2009. – Вып. 37. – С. 228–232.

298. Синькевич, Ю.В. Повышение качества гальванических хромовых покрытий / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Перспективные материалы и технологии: сб. статей Междунар. симпоз., Витебск, 24–26 мая 2011 г. / Витебский гос. технол. ун-т. – Витебск, 2011. – С. 30–32.

299. Иващенко, С.А. Влияние электрохимического полирования на геометрические характеристики качества ионно-вакуумных покрытий / С.А. Иващенко [и др.] // Вакуумные покрытия – 88: тез. докл. науч.-технич. конф., Минск, 20–21 апр. 1988 г. / БелНИИТИ; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Минск, 1988. – С. 83–84.

300. Иващенко, С.А. Обеспечение качества износостойких ионно-вакуумных покрытий на этапе подготовки поверхности упрочняемых изделий / С.А. Иващенко, Ю.В. Синькевич, И.С. Фролов // Прогрессивные методы получения конструкционных материалов и покрытий, повышающих долговечность деталей машин: тез. докл. регион. науч.-технич. конф., Волгоград, 1988 г. / Волгоградский политех. ин-т; науч. ред. Ю.А. Бондарев. – Волгоград, 1988. – С. 104–105.

301. Синькевич, Ю.В. Использование электроимпульсного полирования для повышения качества ионно-плазменных покрытий / Ю.В. Синькевич, И.С. Фролов, Л.П. Симанович // Упрочнение и защита поверхностей газотермическим и вакуумным напылением: материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Киев, окт. 1991 г. / АН УССР, ин-т электросварки им. Е.О. Патона; редкол.: К.А. Ющенко (отв. ред.) [и др.]. – Киев, 1991. – С. 111–115.

302. Кучеров, А.В. Влияние электроимпульсного полирования стальных подложек на параметры качества вакуумно-плазменных покрытий / А.В. Кучеров, И.С. Фролов, Ю.В. Синькевич // Наука и технологии на рубеже XXI века: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2000 г. / Технопринт; под ред. И.П. Филонова, Е.П. Сапелкина, Г.Я. Беляева. – Минск, 2000. – С. 26–30.

303. Синькевич, Ю.В. Повышение качества ионно-плазменных покрытий TiN / Ю.В. Синькевич // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации и модернизации машин: сб. научн. трудов VI Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 24–26 апр. 2007 г.: в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк, 2007. – Т. 2. – С. 139–142.

304. Benjamin, P. Measurement of adhesion of thin films / P. Benjamin, C. Weaver // Proc. Royal Society. – 1960. – No 254. – P. 163–176.

305. Steinmann, P.A. Adhesion testing by the scratch test method: the influence of intrinsic parameters on the critical load / P.A. Steinmann, Y. Tardy and H.E. Hintermann // *Thin Solid Films*. – 1987. – No 154. – P. 333–349.

306. Ichimura, H. Effect of indenter radius on the critical load in scratch testing / H. Ichimura, Y. Ishii // *Surf. Coat. Technol.* – 2003. – No 165. – P. 1–7.

307. Боханович, А.Г. Триботехнические характеристики и долговечность зубчато-ременных передач / А.Г. Боханович [и др.] // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2008. – № 3. – С. 27–30.

308. Беляев, Г.Я. Исследование коэффициента трения электроимпульсно полированных поверхностей деталей / Г.Я. Беляев [и др.] // *Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов по матер. Междунар. научн.-технич. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении»*, Минск, 06–09 апреля 2010 г.: в 2 т. / БНТУ. – Минск, 2012. – Вып. 26. – Т. 1. – С. 14–16.

309. Синькевич, Ю.В. Влияние соотношения площадей поверхностей электродов на устойчивость процесса электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. трудов VII Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 апр. 2009 г.*: в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк, 2009. – Т. 2. – С. 265–269.

310. Справочник по гидравлике / В.А. Большаков [и др.]; под ред. В.А. Большакова. – Киев: Вища школа, 1984. – 343 с.

311. Королев, А.Ю. Технология получения сложнопровильных длинномерных ультразвуковых медицинских волноводов малого диаметра электролитно-плазменной обработкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / А.Ю. Королев. – Минск, 2013. – 229 с.

312. Парфенов, Е.В. Управление технологическими процессами электролитно-плазменной обработки деталей энергетических машин на основе спектральных методов диагностики состояния объекта: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.13.06 / Е.В. Парфенов; Уфимский гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2012. – 32 с.

313. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» / С.И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 1988. – 448 с.

314. Сато, Ю. Обработка сигналов. Первое знакомство: перевод с японского / Ю. Сато; под ред. Ё. Амэмия. – Ohmsha: Додека, 2002. – 175 с.

315. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов / И.С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.

316. Лазаренко, Б.Р. О влиянии включения дополнительной индуктивности на характеристики анодного и катодного процессов / Б.Р. Лазаренко, В.Н. Дураджи, И.В. Брянцев // Электронная обработка материалов. – 1979. – № 5. – С. 8–13.

317. Раствор для полирования металлических изделий: а. с. 1665727 СССР, МКИ5 С 25 F 3/00 / С.И. Романчук, Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина; Белорус. политехн. ин-т. – № 4617566; заявл. 09.12.88. – ДСП.

318. Способ электрохимической обработки поверхности металлических изделий: пат. 2155828 РФ, МПК7 С 25 F 3/00 / Ю.В. Синькевич; заявитель НПП «Эпол». – № 98106979; заявл. 13.04.98; опубл. 10.09.2000 // Официальн. бюл. / Российское агентство по патентам и товарным знакам – 2000. – № 25.

319. Способ электрохимической обработки поверхности металлических изделий: пат. 3604 С1 Респ. Беларусь, МПК6 С 25 F 3/00 / Ю.В. Синькевич; заявитель НПП «Эпол». – № 970226; заявл. 23.04.97; опубл. 30.12.2000 // Официальн. бюл. / Гос. патент. ком. Респ. Беларусь. – 2000.

320. Иванова, Н.П. Механизм анодного растворения коррозионно-стойких и конструкционных углеродистых сталей в условиях электроимпульсного полирования / Н.П. Иванова [и др.] // Наука и техника. – 2013. – № 1. – С 24–30.

321. Синькевич, Ю.В. Влияние технологических режимов обработки на выход металла по току при электроимпульсном полировании конструкционных углеродистых сталей / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–11 апреля 2013 г. / БНТУ; редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 89–92.

322. Синькевич, Ю.В. Теоретические основы механизма съема металла в условиях электроимпульсного полирования низколегированных углеродистых и коррозионно-стойких сталей / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Перспективные материалы и

технологии / А.В. Алифанов [и др.]; под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2013. – Гл. 19. – С. 389–406.

323. Синькевич, Ю.В. Совершенствование технологии изготовления медицинского инструмента из нержавеющей хромистой стали / Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина, С.И. Романчук // Прогрессивные методы получения конструкционных материалов и покрытий, повышающих долговечность деталей машин: тез. докл. межресп. науч.-технич. конф., Волгоград, 1989 г. / Волгоградский политех. ин-т; науч. ред. Ю.А. Бондарев. – Волгоград, 1989. – С. 106–107.

324. Синькевич, Ю.В. Электроимпульсное полирование стали ШХ-15 / Ю.В. Синькевич, Л.Г. Скуратович // Состояние и перспективы развития науки и подготовки инженеров высокой квалификации в Белорусской государственной политехнической академии: материалы Междунар. 51-ой науч.-техн. конф. профессоров, преподавателей, науч. работников, аспирантов и студентов БГПА, посвященной 75-летию БГПА, Минск, 1995 г.: в 8-ми ч. / Белорус. госуд. политехн. академия. – Минск, 1995. – Ч. 2. – С. 115–116.

325. Романчук, С.И. Особенности электроимпульсного полирования медьсодержащих сплавов / С.И. Романчук, Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев // Современные направления развития производственных технологий и робототехника: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 1999 г. / Могилевский машиностр. ин-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 1999. – С. 149.

326. Синькевич, Ю.В. Автоматизация назначения технологических режимов обработки при электроимпульсном полировании / Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев, И.Н. Янковский // Автоматизация технологических процессов: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–16 марта 2011 г. / ООО «Бизнесофсет»; редкол.: Г.Н. Здор (гл. ред.), А.Н. Дербан, Р.В. Новичихин. – Минск, 2011. – С. 38–40.

327. Атанасянц, А.Г. Анодное поведение металлов / А.Г. Атанасянц. – М.: Металлургия, 1989. – 151 с.

328. Антропов, Л.И. Теоретическая электрохимия / Л.И. Антропов. – М.: Высшая школа, 1975. – 560 с.

329. Синькевич, Ю.В. Исследование выхода металла по току при электроимпульсном полировании конструкционных углеродистых сталей / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Вестник БарГУ. Серия: ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ (Физика).

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ (Машиностроение и машиноведение. Процессы и машины агроинженерных систем). – 2013. – Вып. 1. – С. 125–130.

330. Электролит для обезуглероживания стали: а. с. 831816 СССР, МКИЗ С 21 D 3/04 / В.Н. Дураджи, И.В. Брянцев, А.М. Мокрова, Т.С. Лаврова; Ин-т прикл. физики АН МССР. – № 2794829; заявл. 12.07.79; опубл. 23.05.81 // Открытия. Изобретения. – 1981. – № 19.

331. Способ обезуглероживания стали и электролит для его осуществления: а. с. 969761 СССР. МКИЗ С 21 D 8/12, С 25 F 3/06 / С.В. Земский, А.А. Факторович, П.Н. Белкин, Е.А. Пасинковский; Ин-т прикл. физики АН МССР. – № 2904711; заявл. 20.02.80; опубл. 30.10.82 // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 40.

332. Флорианович, Г.М. Кинетика растворения железа, хрома, никеля и их сплавов в активном состоянии: дис. ...докт. химич. наук: 02.00.05 / Г.М. Флорианович. – М., 1984. – 470 с.

333. Подобаев, А.Н. Адсорбционное взаимодействие воды с металлами и его роль в процессах электрохимической коррозии: автореф. дис. ...докт. химич. наук: 05.17.03 / А.Н. Подобаев; Научн.-исслед. физ.-химич. ин-т им. Л.Я. Карпова. – М., 2008. – 48 с.

334. Степаненко, А.В. Улучшение поверхностных свойств нержавеющей сталей электролитно-разрядной обработкой (ЭРО) / А.В. Степаненко [и др.] // Техника. Экономика. Организация. – 2004. – № 5. – С.25–26.

335. Медицинская игла: а. с. 1496802 СССР, МКИ4 А 61 М 5/32 / В.Н. Чачин, Е.Я. Головкина, С.Н. Терехов, Ю.В. Синькевич, С.И. Романчук, М.И. Дегтярев, Н.И. Анощенков, В.И. Муравьева; Белорус. политехн. ин-т. – № 4270369; заявл. 20.04.87; опубл. 30.07.89 // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 28.

336. Способ электрохимического полирования и устройство для его осуществления: а. с. 1630329 СССР, МКИ5 С 25 F 3/00, 7/00 / Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина, О.И. Авсеевич, С.И. Романчук; Белорус. политехн. ин-т. – № 4696710; заявл. 31.05.89. – ДСП.

337. Беляев, Г.Я. Особенности формообразования поверхностей при электроимпульсном полировании / Г.Я. Беляев, Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов / Технопринт. – Минск, 2003. – Вып. 19. – С. 119–124.

338. Синькевич, Ю.В. Электроимпульсное полирование тепловыделяющих элементов / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Про-

грессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. трудов / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2007. – Вып. 33. – С. 259–264.

339. Синькевич, Ю.В. Электроимпульсное полирование прецизионных отверстий / Ю.В. Синькевич [и др.] // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов / БНТУ. – Минск, 2007. – Вып. 22. – С. 44–48.

340. Примеры гидравлических расчетов / А.И. Богомолов [и др.]; под ред. А.И. Богомолова. – М.: Транспорт, 1977. – 526 с.

341. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.

342. Яньшин, Б.И. Гидродинамические характеристики затворов и элементов трубопроводов. Конфузоры, диффузоры и затворы / Б.И. Яньшин. – М.: Машиностроение, 1965. – 259 с.

343. Синькевич, Ю.В. Технология и оборудование электроимпульсного полирования металлов / Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина // Нестандартное оборудование, оснастка, механизация и прогрессивная технология машиностроительного производства: тез. докл. регион. науч.-технич. конф., Владимир, 1989 г. / Владимирский политех. ин-т; под общ. ред. В.Г. Гусева. – Владимир, 1989. – С. 50–51.

344. Малов, Е.К. Установка электроимпульсного полирования / Е.К. Малов [и др.] [и др.]. – Минск: БелНИИНТИ Госплана БССР, 1989. – 4 с. – (Информац. листок БелНИИНТИ Госплана БССР о науч.-техн. достиж. № 89–208).

345. Кацнельсон, В.М. Автоматическая линия ЭИП-1 АЛ / В.М. Кацнельсон [и др.]. – Минск: БелНИИНТИ Госплана БССР, 1989. – 4 с. – (Информац. листок БелНИИНТИ Госплана БССР о науч.-техн. достиж. № 89–244).

346. Синькевич, Ю.В. Установка электроимпульсного полирования «ЭПОЛ-6Н» / Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 2. – С. 77–80.

347. Краткий справочник физико-химических величин. Издание девятое / Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. – СПб: Специальная Литература, 1998. – 232 с.

348. Ганчар, В.И. Параметры теплообмена в процессе анодного электролитного нагрева / В.И. Ганчар // Инженерно-физический журнал. – 1991. – Т. 60, № 1. – С. 92–95.

349. Синькевич, Ю.В. Оценка адекватности физико-математической модели парогазовой оболочки в условиях электро-

импульсного полирования / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. В.Л. Кирпичева и 45-летию ПГУ, Новополоцк, 29–30 окт. 2013 г. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2013. – С. 47–50.

350. Атабеков, Г.И. Основы теории цепей / Г.И. Атабеков. – М: Энергия, 1969. – 434 с.

351. Королева, С.Н. Роль инертности жидкости в развитии электрического пробоя / С.Н. Королева, Г.А. Остроумов // Электронная обработка материалов. – 1966. – № 3 (9). – С. 20–27.

352. Советников, В.П. О возможности взрывного вскипания на докритической стадии электрического разряда в воде / В.П. Советников, Л.Л. Теляшов // Электронная обработка материалов. – 1979. – № 4. – С. 46–49.

353. Дураджи, В.Н. О некоторых параметрах электрической цепи анодного процесса при нагреве металлов в электролитной плазме / В.Н. Дураджи, И.В. Брянцев // Электронная обработка материалов. – 1981. – № 1. – С. 40–43.

354. Станишевский, В.К. Исследование электрической устойчивости системы источник питания–нагрузка при электролитной обработке / В.К. Станишевский [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1988. – № 1. – С. 26–29.

355. Бирич, В.В. Повышение интенсивности процесса электроимпульсного полирования ультразвуковыми колебаниями / В.В. Бирич, Ю.В. Синькевич, А.В. Бирич // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–11 апреля 2013 г. / БНТУ; редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 15–16.

356. Устройство для электрофизической обработки изделия из токопроводящего материала: пат. 8010 U Респ. Беларусь, МПК6 С 25 F 1/100 / Ю.В. Синькевич, А.В. Бирич, В.В. Бирич; заявитель Белорус. национ. технич. ун-т. – № u 20110568; заявл. 13.07.2011; опубл. 28.02.2012 // Официальн. бюл. / Национальн. центр интеллектуальной собств. Респ. Беларусь. – 2012.

357. Устройство для электроимпульсного полирования поверхностей изделия из токопроводящего материала: пат. 18112 C1 Респ.

Беларусь, МПК6 C25F 1/00, C25F 3/16, C25F 7/00, B08B 3/12 / Ю.В. Синькевич, А.В. Бирич, В.В. Бирич; заявитель Белорус. национ. технич. ун-т. – № а 20110707; заявл. 23.05.2011; опубл. 30.04.2014 // Официальн. бюл. / Национальн. центр интеллектуальной собств. Респ. Беларусь. – 2014.

358. Гайсин, А.Ф. Основные физико-химические процессы в плазменно-электролитных разрядах / А.Ф. Гайсин, Р.Н. Кашапов // V Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии: сб. тр., Иваново, Россия, 3–8 сент. 2008 г.: в 2 т. / Ивановский гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2008. – Т. 1. – С. 99–102.

359. Зотова, Е.Е. Растворение никеля из собственной фазы и фазы интерметаллида NiZn в кислых сульфатных растворах: автореф. дис. ...канд. хим. наук: 02.00.05 / Е.Е. Зотова; Воронежский гос. ун-т. – Воронеж, 2002. – 20 с.

360. Шеин, А.Б. Влияние анионов на анодное растворение силицида никеля в серноокислом электролите / А.Б. Шеин, О.С. Иванова, Р.Н. Минх // Вестник удмуртского университета. – 2006. – № 8. – С. 63–74.

361. Синькевич, Ю.В. Основы выбора состава раствора электролита для электроимпульсного полирования металлов и сплавов / Ю.В. Синькевич [и др.] // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. В.Л. Кирпичева и 45-летию ПГУ, Новополоцк, 29–30 окт. 2013 г. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2013. – С. 71–74.

362. Технология машиностроения: В 2 т. Т 1. Основы технологии машиностроения: Учеб. для вузов / В.М. Бурцев [и др.]; под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 564 с.

363. Ульянин, Е.А. Коррозионностойкие стали и сплавы / Е.А. Ульянин. – М.: Металлургия, 1991. – 256 с.

364. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы определения стойкости против межкристаллитной коррозии (измененная редакция): ГОСТ 6032–84 (СТ СЭВ 4076–83). – Введ. 01.07.85. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 33 с.

365. Комбалов, В.С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей / В.С. Комбалов. – М.: Наука, 1983. – 136 с.

366. Крагельский, И.В. Основы расчета на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 327 с.

367. Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – Санкт-Петербург: Питер, 2008. – 320 с.

368. Лукашевич, С.В. Влияние электроимпульсной обработки поверхностей разреза витых ленточных магнитопроводов на их магнитные свойства / С.В. Лукашевич, Ю.В. Синькевич, С.И. Романчук // Механика, кибернетика: тез. докл. XXXIII межресп. студенч. науч.-техн. конф. ВУЗов прибалт. рес.-к, Белорусской ССР и Молдавской ССР, Минск, 11–13 апр. 1989 г.: в 3 ч. / Белорус. политех. ин-т. – Минск, 1989. – Ч. 3. – С. 110.

369. Фролов, И.С. Технология формирования покрытий на немагнитных металлических материалах вакуумно-плазменным методом: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / И.С. Фролов; Белорус. госуд. политехнич. академия. – Минск, 1999. – 21 с.

370. Табаков, В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / В.П. Табаков. – М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.

371. Синькевич, Ю.В. Влияние электроимпульсного полирования подложки на качество вакуумно-плазменных покрытий TiN / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег // Вестник полоцкого гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2008. – № 2. – С. 112–116.

372. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий [и др.]; под общ. ред. Б.И. Костецкого. – Киев: Техніка, 1976. – 296 с.

373. Способ подготовки металлических поверхностей перед нанесением ионно-вакуумных покрытий: а. с. 1662123 СССР, МКИ5 С 23 С 14/00 / Ю.В. Синькевич, И.С. Фролов, С.А. Иващенко, С.И. Романчук, Е.Я. Головкина; Белорус. политехн. ин-т. – № 4641099; заявл. 24.01.89. – ДСП.

Научное издание

СИНЬКЕВИЧ Юрий Владимирович
ШЕЛЕГ Валерий Константинович
ЯНКОВСКИЙ Игорь Николаевич
БЕЛЯЕВ Геннадий Яковлевич

**ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ПОЛИРОВАНИЕ
СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, ХРОМА И НИКЕЛЯ**

Компьютерная верстка *Ю.В.Синькевича*

Подписано в печать 04.07.2014. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 18,98. Уч.-изд. л. 14,82. Тираж 100. Заказ 515.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.