На правах рукописи

Ster

Журавлев Михаил Валерьевич

## ОЧИСТКА И МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ НЕЛЕГИРОВАННОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ МЕТОДОМ В ГАЗЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Специальность: 05.14.12 – Техника высоких напряжений

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:	Ремнев Геннадий Ефимович,		
	доктор технических наук, профессор		

Официальные оппоненты: Сараев Юрии Николаевич, Д.Т.Н., доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук., (г. Томск), Ведущий научный сотрудник лаборатории композиционных материалов.

Ахмадеев Юрий Халяфович, к. т. н, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск), научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится 30 декабря 2015г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <u>http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist</u>.

Автореферат разослан: 12 ноября 2015г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.269.10

Hinfraich

Кабышев А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

работы. Согласно World Steel Association. Актуальность данным общемировой объем производства черных металлов за последние 60 лет вырос в 7 раз и в 2010 году приблизился к уровню 1,5 млрд. тонн, из них в России – 65 млн. тонн. Одновременно с этим происходит повышение требований к качеству металлопродукции, энергоэффективности производства и ресурсосбережению, а также ужесточение законодательства в сфере охраны окружающей среды. В обозначенных целевых показателей, которые, согласно данным качестве агентства Ernst&Young, являются общемировой тенденцией, к 2020 году запланировано снижение энергоемкости производства металлоконструкций на 8..16% при одновременном снижении выбросов сточных вод на 50%, в атмосферу – на 24%. Добиться их реализации возможно только при переходе производства на более эффективные технологии выплавки и обработки металлов, позволяющие повысить качество продукции с минимизацией энергопотребления и загрязнения окружающей среды.

Одной из технологических операций, выполняемой при изготовлении большинства стальных металлоконструкций и оказывающей значительное влияние на качество изделия и его долговечность, является очистка проката. Особенно это актуально для наиболее широко применяемых низкоуглеродистых конструкционных сталей, которые в значительной степени подвержены коррозии. Требования к очистке регулируют международные и отечественные стандарты.

Все основные технологии очистки металлов – механическая, химическая, электрохимическая, ультразвуковая и индукционная – обладают рядом недостатков. Наиболее серьезными из них являются низкая эффективность очистки и образование вредных веществ, загрязняющих окружающую среду. Разрабатываемые в настоящее время новые технологии очистки металлов, основанные на обработке поверхности высококонцентрированными потоками энергии (например, лазерная, электронными и ионными пучками, электролитноплазменная и плазменно-дуговая), практически лишены указанных недостатков. Однако и эти технологии имеют ряд принципиальных особенностей, не позволяющих назвать их универсальными. В связи с вышеизложенным, остается актуальным вопрос о поиске новых методов очистки поверхности металла.

В качестве нового инструмента для очистки поверхности металла, в данной работе предлагается использовать метод, основанный на взаимодействии искровых разрядов с поверхностью металла в газе атмосферного давления. Благодаря таким особенностям метода, как: высокая температура в искровом разряде, простота получения искрового разряда, возможность обработки в различных газах атмосферного давления, экологическая чистота процесса, возможность обрабатывать как крупные, так и мелкие детали и т.д., можно называть этот метод одним из самых перспективных на сегодняшний день.

Данная работа посвящена изучению процесса очистки поверхности металла искровыми разрядами в газах атмосферного давления, выяснению влияния искровых разрядов и параметров обработки на структуру и состав поверхностного слоя, а также определению режимов, при которых будет происходить полная очистка поверхности металла с минимальными изменениями структуры материала подложки.

Цель диссертационной работы: исследовать процесс очистки и модификации поверхности низкоуглеродистой нелегированной стали электроискровым методом в защитном газе атмосферного давления.

Задачи, решаемые в процессе работы:

1. Разработка и создание электроискровой установки с изменяемой энергией в импульсе и варьируемой частотой следования импульсов.

2. Выбор параметров обработки: энергии, межэлектродного промежутка, рабочего газа.

3. Исследование процесса удаления окалины с поверхности металла в процессе электроискровой обработки.

4. Исследование влияния электроискровой обработки на микроструктуру, элементный и фазовый состав поверхностного слоя, а также морфологию поверхности обрабатываемой стали.

Научная новизна:

1. Впервые для очистки поверхности низкоуглеродистой нелегированной стали от окалины в газовой среде атмосферного давления применен электроискровой метод, разработана схема источника питания и конструкция электродной системы, позволяющая полностью удалить оксидный слой.

2. Показано, что при удалении оксидного слоя с поверхности низкоуглеродистой нелегированной стали одновременно с очисткой происходит модификация поверхностного слоя обрабатываемого металла на глубину более 4 мкм.

3. Установлено, что при оптимизации величины параметров высоковольтного источника питания можно обеспечить режим удаления только оксидной пленки толщиной до 10 мкм с поверхности низкоуглеродистой нелегированной стали без изменения величины шероховатости поверхности.

4. Установлено, что при обработке поверхности низкоуглеродистой нелегированной стали электроискровым методом при положительной полярности высоковольтного электрода в чистом азоте атмосферного давления и энергией в импульсе 7 мДж и выше происходит изменение структуры поверхностного слоя металла с формированием нитридной фазы.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Использование высоковольтного импульсного источника питания, включающего высоковольтный и низковольтный генераторы, работающие на один разрядный промежуток, обеспечивает коэффициент передачи энергии выше 75% из накопительной емкости импульсного источника в искровой канал в газе атмосферного давления при межэлектродных промежутках (0,5-3) мм.

2. Электроискровая обработка поверхности низкоуглеродистой нелегированной стали без окалины воздействием искровых разрядов в газе

атмосферного давления при удельных затратах энергии 4 кВт\*ч/м<sup>2</sup> и выше приводит к формированию модифицированного поверхностного слоя толщиной от 4 мкм, по структуре и фазовому составу отличному от состава исходного материала.

3. При электроискровой обработке низкоуглеродистой нелегированной стали с тонким слоем окалины до 0,5мкм и без неё структура поверхностного слоя и шероховатость получаемой поверхности не отличаются.

4. Полное удаление оксидного слоя толщиной до 10мкм с плоской поверхности низкоуглеродистой нелегированной стали обеспечивается в системе острие-плоскость при положительном потенциале острия, расположенного под плоскостью в газе атмосферного давления при удельных затратах энергии до 2кВт\*ч/м<sup>2</sup>.

Идея диссертационной работы заключается в том, чтобы исследовать возможность эффективного применения электроискрового метода для очистки поверхности низкоуглеродистой нелегированной стали в защитном газе атмосферного давления.

Практическая значимость работы заключается том, что разработан новый метод очистки поверхности стали от окалины искровыми разрядами в защитном атмосферного Проведенные исследования газе давления. показывают возможность удаления слоев окалины до 10мкм с поверхности металла с энергозатратами до 1кВ\*ч/м<sup>2</sup>. Простота конструкции установки, экологическая чистота процесса и его низкая энергоемкость дают возможность снизить трудовые и материальные затраты на очистку поверхности стали при использовании этого метода на крупном производстве. Разработанный метод позволяет одновременно с очисткой поверхности модифицировать поверхностный слой металла, придавая ему свойства, позволяющие значительно снизить затраты времени на подготовку металла для дальнейшего использования.

Применение разработанной технологии очистки металла перед дальнейшим его использованием в технологическом процессе позволит повысить качество изготавливаемой из него продукции и снизить процент брака.

В ходе работы был разработан источник питания с высоким коэффициентом полезного действия (получен патент на полезную модель), который может быть использован и при других электроискровых технологиях.

Достоверность полученных результатов обеспечивалась использованием современных методов исследования поверхности металла до и после обработки, а также структуры материала, подвергнутого обработке. Использовалось калиброванное, поверенное и сертифицированное оборудование для фиксации электрических параметров. Кроме того, согласно проведенному литературному обзору, все полученные результаты не противоречат уже известным научным фактам.

Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в непосредственном участии в планировании и выполнении всех работ, проводимых в рамках диссертационной работы. Лично автором проведена следующая работа:

- разработана и сконструирована установка для очистки поверхности металла электроискровым методом в защитном газе атмосферного давления;

- проведены исследования влияния искрового разряда на структуру и фазовый состав поверхностного слоя обрабатываемой стали;

- предложена конструкция электродной системы, позволяющая достигать полной очистки поверхности стали от окалины с наименьшими энергетическими затратами;

- проведен анализ получаемых результатов и сформулированы основные выводы, решены задачи, возникшие по ходу выполнения диссертационной работы.

Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения. С непосредственным участием автора подготавливались научные статьи и выступления на конференциях.

Апробация работы. Основные материалы, изложенные в диссертационной работе, докладывались на семинарах в Институте физики высоких технологий Томского политехнического университета, а также на международных и национальных конференциях: Материалы 9-й международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (г. Минск Республика Беларусь, 2015); Proceedings of the 7th International Conference "Material Technologies and Modeling (MMT-2012)" (Израиль); The 42nd IEEE International Conference on Plasma Science ICOPS2015 (г. Белек, Турция 2015); IV Международной научнотехнической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» BTCHT-2015 (г. Томск).

**Публикации**. В ходе выполнения диссертационной работы были опубликованы 8 научных статей, из них 4 статьи в реферируемых журналах или сборниках статей, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Список литературы включает <u>105</u> наименований. Работа изложена на <u>104</u> страницах, содержит <u>58</u> рисунков и <u>7</u> таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность проводимых исследований, представлены цель и задачи диссертационной работы, приведен краткий обзор содержания диссертации. Сформулированы положения, выносимые на защиту, новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** диссертации сделан анализ данных, полученных в ходе литературного обзора. Кратко описаны известные на сегодня методы очистки поверхности стали, отмечены их основные недостатки. Показано, что

использование электроискровой формы разряда для очистки металлических поверхностей будет иметь следующие существенные преимущества перед другими методами:

• позволяет производить обработку тонких материалов, поскольку не происходит перегрева поверхности в целом;

• не требует вакуумной системы, поскольку искровая обработка осуществляется при атмосферном давлении;

• позволяет производить локальную обработку, то есть в ряде случаев не требует деталь целиком;

• имеет широкий диапазон изменения параметров, что делает метод гибким и позволяет подбирать режим, необходимый для удаления тех или иных загрязнений;

• имеет низкие энергетические затраты и высокий КПД процесса;

• не имеет твердых отходов, а работа в нейтральных газах делает метод экологически чистым;

• позволяет не только очищать, но и модифицировать обрабатываемую поверхность.

В главе уделено внимание электроэрозионной обработке и электроискровому легированию металла, поскольку электроискровая очистка по своей природе и принципу воздействия на поверхность металла схожа с этими технологиями. Рассмотрены физические основы процессов, протекающих в данных видах обработки, а так же устройство и принцип действия установок, применяемых для их реализации. Анализ литературных источников позволил сформировать требования к конструкции электроискровой установки для очистки поверхности металла, определить материал электрода-инструмента И рабочую среду обработки. Также были сформулированы задачи исследования процессов, протекающих при электроискровой очистке поверхности металла И ee воздействии на физико-механические свойства поверхности.

**Во второй главе** описаны конструкция, принципы действия и возможности разработанной лабораторной электроискровой установки. Приведено описание диагностического оборудования для проведения исследований.

Для реализации электроискрового метода очистки поверхности стали, была разработана установка, внешний вид и структурная схема которой изображены на рисунке 1. При разработке установки были соблюдены следующие требования к параметрам: регулируемая энергия в импульсе, регулируемая частота следования импульсов, регулируемый межэлектродный промежуток, униполярный импульс тока, высокий КПД, возможность смены рабочих газов, возможность обрабатывать металлическою пластину площадью 100см<sup>2</sup> и толщиной до 0,2см.

Установка включает в себя следующие части:

- вакуумная кювета;
- электродная система;
- система передвижения обрабатываемого образца;

• система измерения параметров обработки (осциллограф и датчик тока, высоковольтный делитель напряжения, мановакуумметр);

• вакуумная система (вакуумный насос, газовые баллоны с рабочим газом, газовые трассы, газовые краны);

• генератор импульсов.



Рисунок 1. Внешний вид установки (А); структурная схема (Б) электроискровой установки.

Электродная система расположена внутри вакуумной кюветы и состоит из двух электродов, один из которых неподвижен и выполнен в виде заостренного стержня (остриё), вторым электродом является обрабатываемый образец, помещенный на металлический стол системы передвижения (плоскость). В качестве системы передвижения образца используется электро-изолированный координатный стол с двумя степенями свободы. Размер зоны обработки составляет 100мм х 100мм.

Основной особенностью разработанной установки является применение схемы источника питания из двух генераторов, работающих на один межэлектродный промежуток.

Генератор импульсов, используемый в установке, изображен на рисунке 2. В состав генератора входит три основных блока: низковольтная часть, высоковольтная часть, система управления.



Рисунок 2. Функциональная схема генератора.

Высоковольтная часть генератора формирует импульс амплитудой до 18 кВ, длительностью 1 мкс и энергией 0,01 Дж (рисунок 3А). Сформированный импульс напряжения позволяет создать начальный плазменный канал в газе атмосферного давления при максимальном расстоянии между электродами 5 мм.



Рисунок 3. Осциллограммы тока и напряжения на искровом промежутке 2мм в воздухе атмосферного давления: высоковольтный импульс с пробоем межэлектродного промежутка (А); осциллограммы тока и напряжения, полученные в результате разряда накопительного конденсатора (Б).

Низковольтная часть генератора служит для передачи основной энергии в сформированный высоковольтной частью искровой канал. Энергия, передаваемая в искру, накапливается в конденсаторе C2. Заряд этой емкости происходит через индуктивность L за время 180 мкс. Поскольку емкость C1 много больше емкости C2, то напряжение на последнем в два раза больше, чем напряжение на C1. Максимальная частота работы – 5000 Гц. Разряд накопительного конденсатора C2 происходит после образования начального искрового канала (рисунок 3Б).

Система управления генератора предназначена для синхронизации высоковольтной и низковольтной частей генератора с помощью транзисторов VT1 и VT2.

Основные параметры установки приведены в таблице 1.

габлица 1. Основные параметры электройскровой установки.						
Параметры генератора						
Высоковольтная часть						
Длительность в/в импульса	1 мкс					
Амплитуда в/в импульса	18 кВ					
Энергия в/в импульса	0,01 Дж					
Низковольтная часть						
Длительность низковольтного импульса	5100мкс					
Запасаемая энергия	0,10,6Дж					
Частота	0,15 кГц					
Параметры установки						
Рабочие газы	Ar, N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , воздух и др.					
Область обработки	100мм х 100мм					
Габаритные размеры	600мм х 600мм х 1300мм					

Таблица 1. Основные параметры электроискровой установки.

9



Рисунок 4. Траектория электродаинструмента: *а* – ширина кадра; *l* – длина кадра; *h* – расстояние между строк. Траектория движения электродаинструмента над поверхностью изображена на рисунке 4. Двигаясь по такой траектории, электродинструмент сканирует всю поверхность.

Размеры области сканирования задаются системой управления. Возможные диапазоны скорости передвижения и области сканирования приведены в таблице 2.

Оценка потерь энергии в генераторе показала, что они составляют не более 5% от энергии запасаемой генераторе в емкости С2.

Наименование	min	max				
Скорость, мм/с	0,1	6				
Ширина кадра, мм	0,25	100				
Длина кадра, мм	0,25	100				
Расстояние между строками, мм	0,25	2				

Таблица 2. Параметры области сканирования.

изучению влияния энергии, Третья глава посвящена запасаемой в генераторе, величины межэлектродного промежутка на вольт-амперные И коэффициент характеристики разряда полезного действия передачи И накопленной энергии в искровой канал. Также в главе приведены результаты исследования эрозии электрода-инструмента в зависимости от полярности прикладываемого импульса напряжения.

Измерение тока и напряжения производились при запасенных энергиях 8 мДж, 40 мДж, 120 мДж и межэлектродных промежутках 0,5 мм, 1 мм, 1,5мм, 2мм, 2,5мм и 3мм. На рисунке 5 изображены осциллограммы тока i(t) искрового разряда в зависимости от межэлектродного промежутка и запасаемой энергии.



Рисунок 5. Осциллограммы тока в зависимости от: межэлектродного промежутка (А); запасенной энергии (Б).

Осциллограммы тока на рисунке 5А сняты для разряда с энергией в импульсе 40мДж. Из рисунка 5А видно, что при промежутках 0,5мм и 1мм амплитуда и скорость нарастания тока выше приблизительно в 2 раза, нежели при больших промежутках и, помимо этого, время разряда существенно короче (примерно на 6 мкс).

На осциллограммах, показывающих зависимость i(t) в зависимости от энергии, запасаемой в генераторе при неизменном межэлектродном промежутке (рисунок 5Б), видно, что при увеличении энергии увеличивается длительность разряда. При этом скорости нарастания тока и мощности остаются неизменными. Минимум сопротивления искры приходится на максимум тока через искровой промежуток. Значения волнового сопротивления генератора и значения минимальных сопротивлений в максимуме тока при различных энергиях и зазорах представлены в таблице 3.

ruominu 5. comportationne nexposoro kunusu 5 makeninyme roku.									
Энергия,	Сопротивление	Сопротивление искры в максимуме тока при разной							
мДж	генератора, Ом	величине межэлектродного промежутка, Ом							
		0,5 мм	1 мм	1,5 мм	2 мм	2,5 мм	3 мм		
8	0,316	0,75	0,78	1,34	1,67	1,67	2,16		
40	0,141	0,41	0,41	0,69	0,89	0,87	0,82		
150	0,082	0,3	0,38	0,64	0,64	0,64	0,69		

Таблица 3. Сопротивление искрового канала в максимуме тока.

Анализ таблицы позволяет сделать вывод, что сопротивление искры в максимуме токового импульса более чем в 2 раза превышает волновое сопротивление генератора. Также видно, что с увеличением энергии, запасаемой в генераторе, сопротивление искры уменьшается, а с ростом межэлектродного зазора – увеличивается. Скачок увеличения сопротивления при зазорах больше одного миллиметра, возможно, обусловлен тем, что в малых межэлектродных промежутках сказывается влияние паров железа, которые заполняют все пространство между электродами. В то время как при больших зазорах пары заполняют только часть промежутка, и сопротивление определяется только плазмы, формируемой В газе. КПД передачи сопротивлением энергии определялся отношением энергии, выделившейся в искровом канале, к энергии, запасенной в генераторе. Энергия, затраченная на заряд накопительной емкости, в расчетах не учитывалась, поскольку составляет не более пяти процентов от общих затрат (см. Глава 2). Энергия, выделившаяся в искровом канале, рассчитывалась двумя способами: интегрированием произведения тока и напряжения, падающего на искре (1), и определением разницы между накопленной в конденсаторе энергией и оставшейся энергией в нем же после завершения разряда (2). Результаты расчетов представлены на рисунке 6.

Из графиков видно, что КПД перекачки энергии не ниже 76%. С увеличением энергии, накопленной в генераторе, КПД передачи энергии уменьшается, в то время как изменение межэлектродного промежутка не влечет за собой существенного изменения КПД.



Рисунок 6. Зависимость КПД генератора от межэлектродного промежутка и емкости накопителя: 1 – 2мкФ; 2 – 10мкФ; 3 – 30мкФ.

Величина эрозии электродаинструмента зависимости В OT полярности прикладываемого импульса напряжения И энергии запасаемой В генераторе, определялась по изменению массы электрода-инструмента. На рисунке 7 приведены фотографии электродов до обработки после обработки. И Обработка проводилась среде В аргона в течение 10мин.



Рисунок 7. Электроды-инструменты: до обработки (А); после обработки (энергия, выделяемая в искре, – 0,4 Дж, потенциал электрода положительный) (Б); после обработки (энергия, выделяемая в искре, – 0,4 Дж, потенциал электрода – отрицательный) (В).

Ha электроде-инструменте, который находился под положительным потенциалом во время обработки, образуются наросты в виде капель серебристого цвета (рисунок 7Б). Если электрод-инструмент находится под отрицательным потенциалом во время обработки, наблюдается изменение формы электрода в результате эрозионных процессов и без инородных образований (Рисунок 7В). Зависимость изменения массы электрода-инструмента от энергии, запасаемой в генераторе, и полярности импульса напряжения приведены на рисунке 8. В том случае, если электрод-инструмент является катодом, происходит его интенсивная эрозия со скоростью уноса массы ~ 2мГ/мин (при данной конфигурации электрода). Когда электрод-инструмент является анодом, наблюдается прирост массы электрода за счет оседания на его острие капель, состоящих из материала образца (железа), выброшенных в межэлектродный промежуток в результате воздействия искрового разряда. Подтверждением этому является спектр плазмы разряда, на котором наблюдается значительное количество линий железа (рисунок 9).



Рисунок 8. Зависимость изменения массы образца от энергии в импульсе и полярности электродов: 1 — электрод-инструмент является катодом; 2 — электрод-инструмент является анодом.



Рисунок 9. Спектр плазмы в межэлектродном промежутке при обработке стали 08КП с энергией в импульсе 54 мДж.

**В четвертой главе** показано влияние материала электрода-инструмента, рабочего газа, энергии в искровом разряде и потенциала образца на морфологию, фазовый состав и структуру поверхности металла.

Для изучения влияния искрового разряда на очищенную поверхность металла были использованы образцы из стали 08КП без слоя окалины. Обработка поверхности образца производилась в двух газах - аргоне и азоте. Энергия в импульсе задавалась емкостью накопительного конденсатора и составляла 30 мДж, 140 мДж и 400мДж.

В процессе обработки металлической поверхности при отрицательном потенциале электрода-инструмента на поверхности образуется слой налета черного цвета. Чем выше энергия в разряде, тем более равномерный слой образуется на поверхности. На рисунке 10 показаны фотографии поверхности, полученные в разных энергетических режимах.



Рисунок 10. Поверхность металла, обработанная в аргоне, вольфрамовым электродоминструментом, потенциал электрода-инструмента отрицательный: энергия в искровом разряде 1,1кВт\*ч/м<sup>2</sup> (А); энергия в искровом разряде 4,5кВт\*ч/м<sup>2</sup>(Б), энергия в искровом разряде 10кВт\*ч/м<sup>2</sup>(В).

Поперечное сечение образца, обработанного с энергией 400мДж, изображено на Рисунке 11.



Рисунок 11. Поперечное сечение образца, обработанного в аргоне с энергией в искровом разряде 10 кВт\*ч/м<sup>2</sup> (потенциал электрода-инструмента отрицательный).

На фотографиях видно, что поверхность металла имеет

дендритную структуру. Основания дендритов имеют диаметр меньший, чем их верхняя часть, и отличаются цвету, что по может свидетельствовать о более плотной структуре. После химического травления 5% раствором HNO<sub>3</sub> под дендритами наблюдается слой толщиной 2мкм металла  $\sim$ С измененной структурой. Измененный имеет размер зерна слой много меньший, чем исходный образец.

Элементный состав, собранный с поверхности образца, показывает большое наличие вольфрама W и железа Fe.Причем элементный же состав, но сделанный по линии вглубь образца (рисунок 12), показывает, что практически весь вольфрам находится в налете, образовавшемся в процессе обработки.

Согласно дифрактограммам, полученным в результате рентгенофазового анализа, ясно, что на поверхности кроме чистого вольфрама образуется новая фаза интерметолида Fe<sub>7</sub>W<sub>6</sub> (рисунок 13).



Рисунок 12. Распределение вольфрама и железа по линии в глубь образца, обработанного в аргоне с энергией в искровом разряде 10 кВт\*ч/м<sup>2</sup> (потенциал электрода-инструмента отрицательный)



Рисунок 13. Дифрактограмма образца, обработанного в аргоне с энергией в искровом разряде 10 кВт\*ч/м<sup>2</sup> (потенциал электрода-инструмента отрицательный)

Из соотношения площадей под пиками можно сделать вывод, что содержание интерметалида значительно меньше содержания чистого вольфрама.

На рисунке 14 представлены фотографии поверхности стали 08КП, подвергнутой электроискровой обработке в среде азота. Картина, наблюдаемая на поверхности, очень похожа на картину, получаемую при обработке стали в атмосфере аргона.



Рисунок 14. Поверхность металла, подвергнутая обработке в азоте, вольфрамовым электродом-инструментом, потенциал электрода-инструмента отрицательный: затраты энергии 1,1 кВт\*ч/м<sup>2</sup> (А); затраты энергии 4,5 кВт\*ч/м<sup>2</sup> (Б), затраты энергии 10 кВт\*ч/м<sup>2</sup> (В).

Обработанная поверхность также покрыта налетом черного цвета, но если в аргоне поверхность выглядела как скопление гранул (верхушек дендритов), то на образцах, обработанных в среде азота, гранулы собраны в конгломераты, и каждая гранула состоит из еще более мелких гранул (рисунок 14В).



Рисунок 15. Поперечное сечение образца, обработанного в азоте с затратами энергии 10кВт\*ч/м<sup>2</sup> (потенциал электродаинструмента отрицательный).

Под слоем налета, как и на образце, обработанном в среде аргона, наблюдается модифицированный слой толщиной ~ 1мкм с размером зерна ~1 мкм Дифрактограмма, представленная на рисунке 16, показывает, что на поверхности находится нитрид вольфрама W<sub>2</sub>N и отсутствует чистый вольфрам, как на образцах, обработанных в среде аргона при тех же параметрах.



Рисунок 16. Дифрактограмма образца, обработанного в азоте с энергией искровом разряде 400мДж.

фотографии рисунке 17 представлены поверхности Ha обработанных в азоте и аргоне, при прочих равных условиях. При малых

фотографии Ha поперечного сечения образца (Рисунок 15) хорошо что налет имеет слоеную видно, всему структуру, однороден по объему и разбит отдельные на участки. У основания между налетом материалом образца И просматривается щель, четкая которая, говорит о слабой адгезии образовавшимся между налетом поверхностью образца.

Помимо нитрида вольфрама, на поверхности также образуется оксид железа Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> за счет взаимодействия кислорода ИЗ паров воды И сублимированного железа С поверхности образца. Сталь после обработки имеет матовую поверхность серебристого цвета.

образцов,

увеличениях (x1000) поверхность, обработанная в аргоне, является бугристой, в то время как поверхность, полученная в азоте, представляется более однородной.



Рисунок 17. Поверхность металла, подвергнутая обработке вольфрамовым электродоминструментом с затратами энергии 10кВт\*ч/м<sup>2</sup> и отрицательным потенциалом поверхности: в аргоне (А); в азоте (Б).

Однако следует отметить, что при обработке в азоте пористость поверхности значительно выше, нежели при обработке в аргоне (рисунок 18). Этот эффект связан с тем, что азот обладает свойством проникать в расплавленный металл и растворяться в нем, в то время как аргон является абсолютно инертным. В аргоне же поры представляют собой пустоты, образовывающиеся в местах, где расплавленный металл, выплеснутый из кратера, не успевает растечься по поверхности из-за высокой скорости охлаждения. В то же время количество пор на поверхности зависит от энергии, выделившейся в искровом промежутке, и чем она больше, тем поверхность более пористая. Это наблюдается на всех образцах вне зависимости от газовой среды, в которой производилась обработка.



Рисунок 18. Поверхность металла, подвергнутая обработке вольфрамовым электродоминструментом с затратами энергии 10кВт\*ч/м<sup>2</sup> и отрицательным потенциалом поверхности: в аргоне (А); в азоте (Б).

На поперечных сечениях образцов стали (рисунок 19), обработанных в аргоне и азоте, отчетливо видно присутствие на поверхности слоев с модифицированной структурой. Образец, обработанный в аргоне, имеет модифицированный слой ~ 4 мкм с мелкозернистой структурой, с размером зерна ~0,5мкм, сразу переходящей в исходную структуру стали. Образец, обработанный в азоте, на поверхности имеет пористый слой толщиной ~ (1 ÷ 2) мкм. Структура этого слоя не проявляется при химическом травлении 5% раствором азотной кислоты (HNO<sub>3</sub>).

Под этим слоем имеется переходной слой толщиной ~ 2 мкм с мелким зерном размером ~ 2 мкм.



Рисунок 19. Поперечное сечение образцов, обработанных с затраты энергии 10кВт\*ч/м<sup>2</sup> (потенциал электрода-инструмента положительный): в аргоне (А); в азоте (Б).

Фазовый состав поверхности образцов, полученных в аргоне, не отличается от фазового состава исходных образцов, а при больших энергиях, выделяемых в искровом канале, на рентгенограмме появляются пики оксида железа (рисунок 20А). Это связано с наличием в аргоне паров воды.



Рисунок 20. Дифрактограммы образцов, обработанных с затратами энергии 10кВт\*ч/м<sup>2</sup> (потенциал электрода-инструмента положительный): в аргоне (А); в азоте (Б).

На дифрактограммах, снятых с поверхности образцов, полученных при обработке в азоте (рисунок 20Б), появляются пики нитрида железа (Fe<sub>3</sub>N). Причем, чем выше энергия разряда, тем выше интенсивность пиков нитрида. Распределение элементного состава по линии вглубь образца показало, что весь азот находится в области первого модифицированного слоя, имеющего высокую пористость и неопределённую кристаллическую структуру.

Важным фактором, является мощность, выделяемая в искровом промежутке и ее влияние на формирование рельефа поверхности. Образцы, обработанные в аргоне при положительном потенциале подложки, но с разными удельными затратами энергии на площадь поверхности, имеют практически одинаковый рельеф (рисунок 21).



Рисунок 21. Поверхность металла, обработанная в аргоне при отрицательной поверхности образца с электродом инструментом из вольфрама: энергия – 4,5кВ\*ч/м<sup>2</sup>, максимальная мощность – 5,01кВт (А); энергия – 10кВ\*ч/м<sup>2</sup>, максимальная мощность – (5,5-6) кВт (Б).

Это можно связывать с тем, что на процесс формирования рельефа поверхности влияет не столько энергия в импульсе, сколько максимальная мощность, выделяемая в разряде. В данном случае энергия менялась посредством изменения накопительной емкости генератора импульсов, при этом пиковая мощность оставалась неизменной, поскольку она зависит только от напряжения накопительной емкости и индуктивности разрядного контура, а они оставались неизменными. То же самое наблюдается при обработке образцов в азоте.

**В пятой главе** рассмотрено влияние толщины оксидной пленки на процесс очистки. Эксперименты по удалению оксидных пленок проводились на модельных образцах из холоднокатаной стали 08КП со слоем окалины толщиной 0,5мкм и 10мкм. Для нанесения слоя окалины образцы отжигались в муфельной печи. Межэлектродный промежуток составлял 1,5мм. Для выяснения влияния энергии, выделяющейся в межэлектродном промежутке, обработка производилась в нескольких энергетических режимах.

Данные, полученные при обработке образцов, покрытых слоем окалины толщиной 0,5мкм, показывают, что при прочих равных условиях полученная поверхность имеет рельеф, структуру, элементный и фазовый состав такие же, как у обработанной поверхности образца без окалины. Это говорит о том, что пленки толщиной до 0,5мкм не оказывают влияния на процессе модификации. При этом образцы полностью очищаются от окалины.

Эксперименты для удаления толстых оксидных пленок проводились на образцах со слоем окалины 10мкм. Толщина слоя определялась по поперечному сечению образца. Обработка проводилась в четырех энергетических режимах.

При обработке стали с энергией импульса равной 1 мДж на поверхности образуются отдельные кратеры, оставленные искровыми разрядами (рисунок 22А). Места воздействия искрового канала на образцы характеризуются измененной структурой поверхности. Поверхность становится гладкой и покрыта трещинами.



Рисунок 22. Поверхность образцов после обработки: с энергией в импульсе 1мДж (А), с энергией в импульсе 7мДж (Б), с энергией в импульсе 30мДж (В).

При повышении энергии в импульсе до 7 мДж на поверхности наблюдаются участки, свободные от окалины, и участки с окалиной (рисунок 22Б). Площадь очищенной поверхности составляет 30% от общей площади. При увеличении энергии импульса до 30 мДж на поверхности остается еще меньше окалины в виде продолговатых островков и шариков диаметром от 20 мкм до 80 мкм. Если подсчитать их площадь, то можно сказать, что с поверхности образца удаляется ~70% оксидной пленки. Дальнейшее увеличение энергии в импульсе (до 100 мДж) приводит к тому, что на поверхности остаются только шарики окалины (рисунок 22В), а очищенная поверхность составляет те же ~70%. Но при этом диметр шариков окалины составляет от 100 мкм до 150 мкм. Также на поверхности появляются шарики металла диаметром  $\sim 10$  мкм ÷ 20 мкм. Увеличение шариков окалины можно связать с тем, что при увеличении энергии в импульсе происходит расплав большей площади окалины, а за счет более высокой степени нагрева области воздействия катодного пятна, окалина дольше остается в жидком состоянии. Эти два фактора позволяют расплавленному объёму окалины успеть свернуться в шарики под действием сил поверхностного натяжения до начала кристаллизации вещества.

Образование шариков металла происходит в результате разбрызгивания и сублимации металла с последующей конденсацией его на более холодную поверхность образца (металла). Поперечное сечение образца, обработанного с энергией в импульсе ~ 100 мДж, изображено на рисунке 23. На фото можно увидеть, что шарики окалины непрочно лежат на поверхности.



Рисунок 23. Поперечное сечение образца, обработанного с энергией в импульсе 100 мДж.

Этот факт подтверждается также шарики окалины тем, что легко удаляются с поверхности механическим воздействием (жесткой кистью). Шарики имеет столбчатую структуру (рисунок 23). Также отчетливо видно, что поверхностный слой металла в местах, очищенных от модифицирован. окалины не Это тем, что при таких связанно с энергии плотностях на единицу

площади (500 Дж/см<sup>2</sup>) и очень коротким временем воздействия (порядка 40 мкс) на поверхности образуется микровзрыв, который приводит не к плавлению металла, а к его сублимации и разбрызгиванию с последующей конденсацией на уже остывающую поверхность. Для того, чтобы удалять остатки окалины с поверхности образца в процессе его обработки, была изменена конфигурация электродной системы. Теперь при обработке электрод-острие поместили под обрабатываемую поверхность, как показано на рисунке 24.

Шероховатость поверхности после обработки приобретает равномерный игольчатый рельеф, но величина шероховатости поверхности остается неизменной.



Рисунок 24. Электродная система: 1 – обрабатываемая поверхность; 2 – электродостриё.



Рисунок 25. Поверхность, очищенная на установке с измененной конфигурацией электродной системой.



Рисунок 26. Профиль поверхности образца: до обработки (А); после обработки (Б).

Таким образом, при изменении конфигурации электродной системы поверхность очищалась на 99% (рисунок 25). Причем энергия в импульсе составляла всего ~ 30 мДж. Поверхность образца при этом однородна и имеет развитый игольчатый рельеф (рисунок 26Б).

**В заключении** приведены научные и технические результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Разработана лабораторная электроискровая установка для очистки и модифицирования поверхности металла, позволяющая обрабатывать образцы размером до 100мм х 100мм х 20 мм, с межэлектродным промежутком до 3мм. Генератор обеспечивает возможность работы с энергиями 0,1Дж - 0,6Дж в импульсе с частотой следования до 5000Гц и потерями энергии в генераторе не более 3% от накопленной энергии. В результате согласования волнового сопротивления генератора и сопротивления нагрузки импульс тока через межэлектродный промежуток носит апериодический характер, что позволило в

газе атмосферного давления при межэлектродных промежутках (0,5-3)мм достичь КПД процесса перекачки энергии из накопителя в искровой канал не ниже 75%.

2. Показано, что в процессе обработки металлической поверхности, при отрицательном потенциале электрода-инструмента, на поверхности образуется налет, состоящий из материала электрода-инструмента и его соединений. В налете, полученном в аргоне, это интермиталид  $Fe_7W_6$ , а в слое, полученном в азоте, это нитрид  $W_2N$ . При этом под образовавшимися слоями на поверхности металла имеется модифицированный слой с измененной кристаллической структурой, причем при обработке в аргоне модифицированный слой имеет толщину ~ 2 мкм и размер зерна много меньший, чем исходный образец, а слой полученный в азоте имеет толщину ~ 1мкм и такой же размер зерна.

обработанная 3. Поверхность стали, при положительной полярности электрода-инструмента, имеет матовую поверхность серебристого цвета. Причем обработка в азоте дает более однородную и пористую поверхность, нежели обработка в аргоне. Поверхность стали, полученная в результате обработки с положительным потенциалом электрода-инструмента в атмосфере аргона, имеет волнистый рельеф с образованием модифицированного поверхностного слоя, толщиной ~ 4 мкм, имеющего кристаллическую структуру с размером зерна ~ 0,5 мкм, с фазовым составом, не отличающимся от исходного. Поверхность стали, полученная в результате обработки в атмосфере азота, имеет однородный развитый рельеф с образованием двух модифицированных поверхностных слоев толщиной по ~ 2 мкм. Верхний модифицированный слой пористый и стоек к химическому травлению в 5% растворе азотной кислоты. Второй слой имеет кристаллическую структуру с размером зерна ~ 2 мкм. Фазовый состав поверхности стали отличается от исходного наличием пиков нитрида железа Fe<sub>3</sub>N.

4. Установлено, что слои окалины до 0,5мкм на поверхности стали не влияют на структуру модифицированного слоя и морфологию поверхности, поскольку они совпадают с образцами, обрабатываемыми без предварительного нанесения слоя окалины.

5. Показано, что при обработке стали со слоем окалины толщиной ~ 10 мкм ее полное удаление достигается при расположении электрода инструмента под обрабатываемой поверхностью. При этом удельные затраты энергии составляют 2 кВт\*ч/м<sup>2</sup>.

## Список основных публикаций по теме диссертации

Издания, рекомендованные ВАК

1. Журавлев М. В. Формирование аморфного приповерхностного слоя при электроискровой обработке стали 08Г2С / Ю. П. Егоров, Г. Е. Ремнев, М. С. Слободян, И. Л. Стрелкова, Б. Г. Шубин, М. В. Журавлев // Изв. вузов. Физика. – 2011. – №11/3. – С. 175-178.

2. Журавлев М. В. Электроискровая очистка поверхности стали 08Г2С / Егоров Ю. П., Ремнев Г. Е., Слободян М. С., Стрелкова И. Л., Шубин Б. Г.,

Журавлев М. В.// Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 2. – С. 63-67.

3. Журавлев М. В. Влияние параметров шероховатости на контактное сопротивление при электроискровой очистке поверхности стали / М. С. Слободян, Б. Г. Шубин, М. В. Журавлев // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т.6. - №2. – С.183 – 188.

4. Журавлев М. В. Электроискровая очистка поверхности низкоуглеродистой стали / Ю. П. Егоров, Г. Е. Ремнев, М. С. Слободян, И. Л. Стрелкова, Б. Г. Шубин, М. В. Журавлев // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – №2. – С.48-52.

Патент:

Журавлев М. В. Патент на полезную модель № 130247RU, МПК7 В23H1. Устройство для электроискровой обработки металлических поверхностей / Г. Е. Ремнев, С. М. Слободян, Б. Г. Шубин, М. В. Журавлев. Заявлено 09.01.2013. Опубликовано 20.10.2013.

Тезисы докладов конференций:

1. Zhuravlev M.V. The system for spark cleaning of low carbon steel M.S. Slobodyan, B.G. Shubin, M.V. Zhuravlev // Abstracts of 3rd International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High Current Electronics and Modification of Materials with Particle beams and Plasma Flows. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2012. – С. 249

2. Журавлев М. В. Электроискровая очистка стали 08Г2С / М. С. Слободян, Б. Г. Шубин, М. В. Журавлев // Сб. тр. VII МНПК «Современные вопросы науки – XXI век». – Тамбов: - 2011. – Вып. 7. – Ч. 3. – С. 63.

3. Журавлев М. В. Очистка поверхности стали 08Г2С электроискровым методом Ю. П. Егоров, М. С. Слободян, И. Л. Стрелкова, Б. Г. Шубин, М. В. Журавлев // Материалы 9-й междунар. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом». – Минск. - 2011. – С. 219-221

4. Zhuravlev M. Cleaning Low Carbon Steel Surface by Spark Treatment Yu. Egorov, G. Remnev, B. Shubin, M. Slobodyan, I. Strelkova, M. Zhuravlev // Proceedings of the 7th International Conference "Material Technologies and Modeling (MMT-2012)". Ariel, August 20-23 2012. – Ariel: Ariel University Center of Samaria, 2012. – pp. 1-174–1-179.