

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Журавлев Михаил Валерьевич

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

Специальность: 05.14.12 – Техника высоких напряжений

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор Ремнев Г.Е.

Томск – 2015

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. (Обзор литературы)	10
1.1 Традиционные методы очистки поверхности металлов	10
1.2 Электрические методы очистки.	14
1.3 Предпосылки использования электроискрового разряда для очистки поверхности металла.	20
1.3.1 Электроэрозионная обработка.....	22
1.3.2 Электроискровая модификация поверхности.	26
1.3.3 Выбор материала электрода и полярности импульса напряжения.	28
1.4 Обзор генераторов для формирования электрической искры.....	31
Выводы по главе:	35
Глава 2 (Методика проведения исследований)	36
2.1 Состав и принцип работы импульсной электроискровой установки	36
2.2 Средства измерения электрических параметров установки.....	42
2.3 Расчет потерь энергии генератора при обработке поверхности образцов.....	44
2.4 Объекты исследования, характеристика модифицированной поверхности.....	47
Выводы по главе:	49
Глава 3 (Характеристики генератора)	50
3.1 Влияние энергии, запасаемой в генераторе и величины межэлектродного промежутка на вольт-амперные характеристики разряда.....	50
3.2 Влияния энергии накопленной в генераторе и межэлектродного промежутка на величину энергии выделенной в межэлектродном промежутке.....	54
3.3 Величина импульсной эрозии электрода-инструмента в зависимости от полярности и энергии генератора	56
Выводы по главе:	59
ГЛАВА 4 (Модификация поверхности).....	60
4.1 Обработка поверхности стали при использовании вольфрамового электрода-инструмента с отрицательным потенциалом.....	61
4.1.1 Обработка поверхности электроискровым разрядом при отрицательной полярности электрода-инструмента в атмосфере аргона.	61
4.1.2 Обработка поверхности электроискровым разрядом при отрицательной полярности электрода-инструмента в атмосфере азота.....	67
4.2 Обработка поверхности стали при использовании вольфрамового электрода-инструмента с положительным потенциалом.	71

4.3 Влияние мощности выделяемой в искровом промежутке на рельеф поверхности.	76
Выводы по главе:	78
Глава 5 (Очистка поверхности образцов стального проката).....	79
5.1 обработка поверхности стали с оксидной пленкой толщиной до 1 мкм	79
5.2 Обработка поверхности стали с оксидной пленкой толщиной 10мкм.....	82
5.3 Электродная система позволяющая производить полное удаление слоя окалины	89
Выводы по главе:	91
Заключение.	93
Список литературы	95
Приложение	102

Введение

Согласно данным World Steel Association [1] 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 повысились требования к качеству металлопродукции, энергоэффективности производства и ресурсосбережению, а также произошло ужесточение законодательства в сфере охраны окружающей среды [2]. В качестве обозначенных целевых показателей, которые, согласно данным 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% [2]. 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.

Очистка проката является одной из технологических операций, выполняемой при изготовлении большинства стальных металлоконструкций и оказывающей значительное влияние на качество изделия и его долговечность. Эта операция наиболее актуальна для широко применяемых низкоуглеродистых конструкционных сталей, которые подвержены коррозии [3]. Требования к очистке регулируют международные и отечественные стандарты [4, 5].

Все основные технологии очистки металлов – механическая, химическая, электрохимическая, ультразвуковая и индукционная – обладают рядом серьезных 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, электролитно-плазменная и плазменно-дуговая) практически лишены указанных недостатков. Однако и эти технологии имеют ряд существенных недоработок не позволяющих назвать их универсальными. В связи с чем, 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 возможности очищать поверхность металла искровыми разрядами в газе 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 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 4мкм.
3. Установлено, что при оптимизации величины параметров высоковольтного источника питания, можно обеспечить режим удаления только оксидной пленки толщиной до 10мкм 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 7мДж 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 межэлектродном 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 4кВт*ч/м² и выше приводит к формированию модифицированного поверхностного слоя толщиной от 4мкм 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/м².

Практическая значимость работы заключается том, что разработан новый метод очистки поверхности стали от окалины при помощи искровых разрядов в защитном газе атмосферного давления. Проведенные исследования показывают возможность удаления слоев окалины до 10мкм с поверхности металла с энергозатратами до 2кВ*ч/м². 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, способные 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 измерения 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, выполняемых 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, на международных и национальных конференциях: Материалы 9-й международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (г. Минск, Республика Беларусь); Proceedings of the 7th International Conference “Material Technologies and Modeling (ММТ-2012)” (Израиль); The 42nd IEEE International Conference on Plasma Science ICOPS2015 (г. Белек, Турция 2015); IV

Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» ВТСНТ-2015 (г. Томск).

Публикации. В ходе выполнения диссертационной работы были опубликованы 8 научных работ, из них 4 – статьи в реферируемых журналах или сборниках статей, рекомендованных ВАК, 1 патент на полезную модель.

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

Содержание работы

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

В первой главе приведен литературный обзор существующих методов очистки поверхности стали, указаны их достоинства и недостатки. Подробно описаны существующие способы электроискровой обработки поверхности металлов, сделаны выводы и заключения о возможности применения искрового разряда для очистки поверхности металла.

Во второй главе описывается конструкция разработанной электроискровой установки для очистки плоских металлических пластин. Подробно изложены конструкция и принцип действия высоковольтного генератора и обозначены его особенности. Описаны средства и методы исследования электрических параметров разряда и методы исследования состояния поверхности после обработки.

В третьей главе рассмотрено влияние запасаемой энергии в генераторе и величины межэлектродного промежутка на вольтамперные характеристики разряда. Показана зависимость энергии, выделившейся в разрядном промежутке, от энергии генератора и величины межэлектродного промежутка.

В четвертой главе приводятся результаты исследования состояния поверхности после обработки искровыми разрядами в разных газах атмосферного давления. Рассмотрено влияние рабочего газа и энергетического режима на структуру, элементный и фазовый составы поверхностного слоя металла.

В пятой главе приводятся результаты экспериментов по удалению окислов с поверхности металла искровыми разрядами в газе атмосферного давления. Изложены результаты изучения

состояния, структуры и элементного состава поверхностного слоя после удаления окалины с поверхности металла. Предложена электродная система, позволяющая полностью удалять окалину с поверхности металла.

В заключении приводятся основные выводы, полученные в результате выполнения диссертационной работы.

Глава 1. (Обзор литературы)

1.1 Традиционные методы очистки поверхности металлов.

На сегодняшний день механические методы очистки поверхности металлов, являются самыми доступными и широко используемыми в промышленности. Это связано с их простотой и легкой реализуемостью.

Все механические и физические методы очистки металла можно разделить на следующие категории [6]:

1. Очистка ручным инструментом
2. Очистка механизированным инструментом
3. Струйная абразивная очистка
4. Гидроабразивная очистка
5. Очистка сухим льдом
6. Ультразвуковая очистка

Очистка ручным инструментом подразумевает очистку с помощью инструмента, не требующего энергопитания. Это очистка с помощью щеток, скребков, шпателей, абразивных шкурок, наждака, молотков и т.д. Ручной инструмент в основном применяют для очистки относительно легко удаляемых загрязнений или очистки мест, недоступных обработке другими способами.

Очистка механизированным инструментом подразумевает очистку с помощью ручных механизированных инструментов таких, как вращающиеся проволочные щетки, машины для зачистки абразивными дисками или шкурками, игольчатыми пистолетами, шлифовальными кругами и т.д.

Если поверхность имеет сложную геометрию поверхности, то шлифование практически трудно реализовать. Шлифовать мягкие металлы, стали и сплавы затруднительно. Например, удаление поверхностных дефектов в нержавеющей стали проблематично.

Крацевание не гарантирует высококачественной очистки поверхности от загрязнений и не устраняет дефекты поверхностного слоя. Операцию крацевания трудно механизировать, и она выполняется на станках вручную.

Струйная абразивная очистка достигается за счет удара абразивного потока с высокой кинетической энергией о подготавливаемую поверхность. Существует много способов придания кинетической энергии абразиву, например: подача абразива в поток воздуха или подача абразива на вращающиеся лопасти, разбрасывающие его равномерно и с большой скоростью и т.д. В качестве абразива может использоваться песок, дробь и другие вещества. В

некоторых случаях в струю абразива добавляют небольшое количество жидкости с целью уменьшить количество пыли.

Гидроабразивная очистка достигается в результате подачи на очищаемую поверхность мелких абразивных частиц в воде или другой жидкости под высоким давлением. Варьируя давление жидкости можно добиться удаления практически всех видов загрязнений. Также варьируя тип абразива можно добиться разной степени очистки.

Очистка сухим льдом подразумевает струйную абразивную очистку, когда в качестве абразива используются гранулы сухого льда. Гранулы сухого льда, имея значительно более низкую температуру по сравнению с очищаемой поверхностью, снижают температуру поверхностного слоя, что вызывает отслаивание от поверхности загрязнений, доведенных до хрупкого состояния, за счет различных коэффициентов линейного расширения. При соударении с поверхностью объекта гранулами сухого льда подводится огромное количество холода. В результате теплообмена твердые частицы CO₂ мгновенно нагреваются и переходят в газообразное состояние, стремясь расшириться в объеме в сотни раз. Образовавшийся газ, частично проникая в пространство между загрязнениями и очищаемой поверхностью, образует так называемый газовый клин, отрывающий частицы загрязнений от поверхности [7]. Для полного удаления загрязнений необходимо перманентное механическое воздействие на очищаемую поверхность. Этот процесс обеспечивается за счет кинетической энергии гранул сухого льда, вылетающих из устройства распыла со значительной скоростью [8].

Основными недостатками струйной абразивной и гидроабразивной обработки являются:

1. Образование абразивной пыли при абразивной обработке, что требует применения соответствующего оборудования, улавливания и удаления пыли.
2. Попадание абразивной пыли или гидроабразивной жидкости в микропоры, микротрещины поверхности, что ухудшает эксплуатационные свойства поверхности.
3. Утилизация гидроабразивной жидкости.

Дополнительно можно выделить следующие недостатки абразивной струйной обработки:

1. Необходимость замены части оборудования, например лопаток турбин.
2. Не на все очищаемые поверхности абразив действует благоприятно.
3. При пескоструйной очистке оборудования, механизмов может происходить их разгерметизация, что является недопустимым.
4. Поверхность металла после пескоструйной очистки имеет свойство быстро окисляться и насыщаться влагой, так что последующая операция окраски поверхности должна выполняться не позднее 4-х часов после очистки.

5. Значительные затраты на очистку и утилизацию рабочего материала, расход которого довольно велик.

6. Высокие энергетические затраты абразивной очистки, достигающие до 100 кВт(наверное нужна площадь) и выше.

Ультразвуковая очистка осуществляется в жидкой среде в результате воздействия на металл ультразвуковых волн, вызывающих эффект кавитации. Схлопывание кavitационных пузырьков сопровождается мощными гидравлическими ударами, приводящими к ослаблению молекулярных сил между частицами грязи и основным материалом, в результате чего с очищаемых деталей срываются инородные тела, загрязняющие поверхность. Способ позволяет осуществить очистку деталей сложной формы, что не могут сделать другие механические и физические способы [9]. Недостатком данного метода является невозможность удаления таких загрязнений как ржавчина или окалина.

Из перечисленных выше способов очистки самыми худшими являются очистка ручным и механизированным инструментом, поскольку они обеспечивают наименьшую степень очистки в сравнении с остальными методами и не позволяют автоматизировать процесс. Все эти методы обладают недостатками, не позволяющими назвать их универсальными. Самым главным их недостатком является невозможность удаления некоторых видов загрязнений, что приводит к необходимости дополнительной обработки металла.

Химическая очистка поверхности металла

К химическим методам очистки металла от ржавчины и прокатной окалины относятся кислотное и щелочное травление. Травление предполагает опускание изделия в баки с растворами щелочи или кислоты и проводится в специальных помещениях. После процедуры травления с поверхности металла необходимо удалять остатки раствора, обычно это делают с помощью воды.

Кислотное травление производится в растворах воды и кислоты (кислота подбирается в зависимости от природы загрязнения) с добавлением солей. В результате происходит растворение загрязнения и травление основного металла. Скорость удаления зависит от физико-химических свойств загрязнения. В связи с тем, процесс сопровождается довольно сильным испарением кислоты, травление осуществляется в специальных вентилируемых помещениях с контролем концентрации паров кислот в воздухе помещений и в выбросах в атмосферу [10].

Щелочное травление осуществляется в растворах щелочи и применяется, как правило, для удаления оксидов железа. Процесс щелочного травления происходит в результате взаимодействия раствора $NaOH$ с оксидами железа. Продуктами реакции являются восстановленные железо, ферриты и перлиты. Последние довольно легко растворяются в кислоте [10]. Щелочное травление требует особых мер предосторожностей и технической

оснастки. Ванна, в которой происходит процесс травления, должна быть всегда закрыта, чтобы исключить попадание воды.

Для улучшения качества и ускорения процесса очистки в ванне с раствором располагают электроды, одним из которых служит очищаемая деталь. На электроды подают постоянное напряжение. В процессе поляризации раствора постоянным током на поверхности электродов образуются газовые пузырьки, которые отрываясь от поверхности металла уносят часть загрязнения, тем самым очищая поверхность. Данный способ получил название электрохимический метод очистки (ЭХО).

Химические методы очистки поверхности от загрязнений органического характера имеют следующие недостатки:

1. Низкая производительность.
2. Процесс является экологически неблагоприятным.
3. Требуются расходные материалы.
4. Процесс не позволяет исправлять дефекты поверхностного слоя.

1.2 Электрические методы очистки.

Все выше перечисленные методы, несмотря на их распространённость в промышленности, обладают рядом существенных недостатков, не позволяющих назвать их оптимальными.

На сегодняшний день, на передний план выходят электрические методы очистки поверхности металла, поскольку они обладают рядом преимуществ, недоступных традиционным методам. Самыми важными преимуществами являются высокая степень и скорость очистки при экологически чистом производстве. Кроме того, некоторые методы позволяют не только чистить, но и модифицировать поверхность металла.

Исследования в области очистки и модифицирования поверхности металлов электрическими методами выполняются различными группами ученых с середины XX века как российскими [11-15 и др.], так и зарубежными [16-17 и др.].

Несмотря на разнообразие электрических методов, все они основываются на двух физических явлениях. Это бомбардировка поверхности металла электронами или ионами вещества и термическое воздействие на поверхностный слой. Бомбардировка высокоэнергетичными частицами приводит к разрушению загрязнения. Термическое воздействие приводит к испарению (сублимации) вещества с поверхности металла или к отслаиванию загрязнения из-за разницы тепловых коэффициентов расширения вещества загрязнения и металла.

К основным электрическим методам обработки, с помощью которых можно производить очистку поверхности металла можно отнести следующие их виды:

- Очистки тлеющим разрядом;
- Индукционная очистка;
- Лазерная очистка;
- Вакуумно-дуговая очистка.

Очистка тлеющим разрядом

Использование тлеющего разряда как инструмента очистки поверхности стали встречается в следующих источниках [18-19].

Механизм очистки поверхности металла заключается в бомбардировании загрязненной поверхности ионами нейтрального газа. Ионы получают в плазме аномального тлеющего разряда при пониженном давлении. В качестве рабочего газа в основном используют аргон, благодаря таким его свойствам как: инертность, легкая ионизируемость, относительно большая масса ионов и доступность. Для того чтобы ионы бомбардировали очищаемую поверхность катодом должна служить обрабатываемая деталь. Использование тлеющего разряда в качестве

поставщика ионов, обусловлено возможностью регулировать их энергию. Для регулировки энергии ионов есть два способа: изменение напряжения между электродами и изменения рабочего давления в камере.

Поскольку очистка тлеющим разрядом в аргоне является разновидностью ионного распыления, при давлении выше 13,3 Па на обрабатываемой поверхности образуются плотные адсорбированные слои, препятствующие эффективной очистке [20]. Поэтому диапазон давлений для обработки тлеющим разрядом составляет $\sim 1,5 \div 13$ Па. А падение напряжения в катодной области $\sim 300 \div 4000$ В при межэлектродном падении напряжений $\sim 600 \div 5000$ В.

Индукционная очистка

Это способ подготовки поверхности металла, при котором металл пропускают через цилиндрическую камеру индуктора и нагревают его токами высокой частоты. Результатом нагрева является термомеханическое разрушение загрязнения.

Принципиальной особенностью технологий высокочастотной плазменной подготовки в газовой атмосфере поверхности исходного, поступающего с металлургических предприятий, горячекатаного проката в виде мотков проволоки или мерных прутков заключается в следующем.

В закрытой полости индуктора, под действием индуцированных в проволоке вихревых токов температура ее поверхности увеличивается – происходит процесс нагрева проволоки. Одновременно с нагревом поверхности проволоки в полости индуктора создают поток газовой атмосферы. При достижении частоты тока определенного значения, последовательно происходит: активация границы поверхностного слоя газовой атмосферы и поверхности металла, возникает на этой границе электрический ток, происходит разогрев контактного слоя газовой атмосферы, и под действием термической ионизации, роста температуры проводимости слоя газовой атмосферы происходит возбуждение высокочастотного плазменного разряда, непосредственно на поверхности обрабатываемого металла. Под действием температуры высокочастотного плазменного разряда (10000 °С), превышающей температуру кипения любого вещества, при давлении близком к атмосферному, происходит испарение загрязненного слоя с поверхности металла. Поверхностный слой металла сжижается и испаряется.

Поскольку основная доля в проводимости разрядной зоны обусловлена ионами металла, механизм саморегулирования замедляет испарение чистых металлов и ускоряет испарение неметаллических загрязнений. Замкнутые вихревые токи при разогреве высокочастотной плазмы обеспечивают равномерное удаление загрязнений и неглубокие изменения в структуре основного металла. Образующаяся чистая металлическая, активированная поверхность металла

подготовлена для качественного проведения последующих процессов: плакирования, напыления, нанесения промежуточных технологических покрытий.

Основные преимущества индукционного способа очистки над описанными ранее методами, заключаются в следующем:

- Поверхность металла качественно очищается, сжижение поверхности приводит к «залечиванию» поверхностных дефектов и поверхность металла активируется для широкого класса дальнейших технологических процессов.
- Скорость очистки поверхности и время подготовки металла к последующим операциям значительно отличается от очистки поверхности травлением в растворах кислот.
- Возможность совмещения процессов очистки и нагрева исключает дополнительный нагрев при последующей горячей высадке или объемной штамповке.
- Оборудованию требуются малые производственные площади, что позволяет встраивать процесс очистки металла в любую непрерывную технологическую линию.
- Экономия на дорогостоящих расходных материалах и экологически чистая технология.

К числу основных недостатков можно отнести следующие:

- Капитальные затраты на основное оборудование: преобразователи частоты, станции управления, кабельное хозяйство.
- Технология эффективна при применении длинномерных прутков или мотков
- В настоящее время отсутствует обобщенная методика выбора оптимальных параметров режима обработки для разных видов металлопроката и используемого оборудования [21].

Очистка воздействием пучком высокоэнергичных ионов

Облучение поверхности металла мощным ионным пучком приводит к удалению с поверхности легкоплавких примесей и углеводородных загрязнений [22, 23]. При этом плотностью тока в **пучке** можно регулировать температуру поверхностного слоя вплоть до его расплавления с образованием пароплазменного слоя. Авторы статьи [24] утверждают, что при воздействии ионных пучков на поверхность металла с плотностью мощности 10^7Вт/см^2 на поверхности протекают следующие процессы:

- нагрев, плавление, испарение материала поверхности;
- образование пароплазменного факела;
- возбуждение волн сжатия в мишени за счет импульса отдачи;
- перемешивание компонентов поверхностного слоя, протекание химических реакций;
- быстрое остывание нагретого поверхностного слоя вглубь мишени со скоростями $\sim 10^9$ К/с.

Теоретически глубина проникновения ионов в металл определяет толщину слоя, который может быть удален. Как правило, для ионного пучка наносекундной длительности это глубины в металлах -1 мкм [24]. За один импульс тока могут быть удалены слои толщиной -0,1-1 мкм. Практическое применение мощного ионного пучка для очистки поверхности лопаток газотурбинных двигателей обосновано группой ученых в 1992 году [25-27]. После того как лопатки отработывают срок эксплуатации, установленный производителем, на них образуется нагар и формируется слой оксида. После облучения мощным ионным пучком с плотностью тока $>100 \text{ А/см}^2$ происходит удаление нагара и изменение морфологии и структуры поверхности. Благодаря изменению физико-химических свойств поверхности лопаток после их обработки, рабочие характеристики лопаток удалось повысить до уровня исходных серийных образцов. Энергетические затраты при этом составляют от 0,1-1 кВт*ч/м² [24].

Еще один пример применения ионного пучка для очистки стальной полосы из стали 08КП был предложен в ИАЭ им. Курчатова. Для этой цели использовался ускоритель ионов с замкнутым циклом электронов и протяженной зоной ускорения УЗДП-100. Авторы исследования показали, что по скорости и качеству очистки данный метод превосходит традиционные методы очистки [28].

Главными недостатками этого метода являются необходимость поддержания вакуума на протяжении всей обработки, а также невысокий ресурс работы.

Лазерная очистка

В основе механизма лазерной очистки поверхности металла, лежат такие физические процессы как испарение и абляция материала с образованием плазмы, а также быстрое тепловое расширение и возникновение ударных волн. Лазерную очистку можно, по механизму удаления, условно разделить на три группы [29]:

- Испарительная лазерная очистка;
- Ударно-механическая лазерная очистка;
- Влажная лазерная очистка.

Испарительная лазерная очистка основана на том, что практически все загрязнения имеют коэффициент поглощения света на несколько порядков ниже, чем коэффициент поглощения света у металлов, поскольку являются неметаллами. В связи с этим, при попадании лазерного луча на поверхность он проходит загрязнения насквозь и поглощается материалом подложки, в результате чего та разогревается до температуры сублимации, и образовавшиеся пары металла разрушают слой загрязнения, тем самым очищая поверхность [30].

Задача выбора оптимального режима работы лазера, в испарительном режиме очистки, сводится к обеспечению минимального порога испарения вещества основного металла.

Известно, что таковой достигается в импульсном режиме воздействия [30]. Кроме того, чем меньше длительность воздействия, тем меньше объём прогретой зоны вещества и, следовательно, меньше количество образующегося расплава и пара (т.е. меньше повреждение основного вещества) при большем давлении последнего. Например, при воздействии импульса 10нс и мощностью 10мДж, сфокусированного в пятно диаметром 0,2 мм, плотность мощности в зоне обработки достигает 3 ГВт/см². При данной плотности мощности глубина прогретого слоя стали составляет 10⁻⁴–10⁻⁵ см, при этом испарение происходит практически без образования расплава на поверхности вещества, а значит и модификация исходной поверхности минимальна.

Для очистки поверхности применяют импульсное лазерное излучение с длительностью импульса несколько десятков наносекунд и плотностью мощности в зоне обработки 10⁷...10¹⁰Вт/см² при диаметре сфокусированного пятна пучка лазера ≈ 0,5 мм, с энергией в импульсе несколько мДж и частотой следования импульсов более 20 кГц.

Ударно-механическая лазерная очистка проводится в низкоэнергетических режимах (недостаточных для сублимации материала образца), чтобы предотвратить разрушение поверхностных слоев или возникновение в них нежелательных физических и химических изменений в результате избыточного теплового воздействия. Механизм очистки связан с быстрым тепловым расширением загрязняющих частиц, пленок или поверхностных слоев основного материала при поглощении лазерного излучения и возникновением вследствие этого ударной волны в материале (и в воздухе), а также взрывным удалением имеющихся газов и образующихся паров [31].

Влажная лазерная очистка. При влажной лазерной очистке поверхность перед обработкой покрывают тонким слоем жидкости и задача состоит в испарении слоя жидкости, кипение которого разрушает и выносит загрязнения. При поглощении лазерного излучения в основном материале жидкость вблизи его поверхности нагревается до температуры, превышающей температуру ее кипения при нормальном давлении, что необходимо для инициирования объемного (пузырькового) кипения. При импульсном воздействии излучения после прекращения импульса энергетическая подпитка паровых пузырьков прекращается, вследствие отвода тепла в окружающую их жидкость, они уменьшаются в размере и схлопываются. Совокупное схлопывание (сброс давления) - коллапс пузырьков приводит к возникновению ударной волны в жидкости, которая, распространяясь вглубь материала, вызывает разрушение загрязняющего слоя и выброс жидкости и образующихся продуктов очистки [32].

Вакуумно-дуговая очистка

Первый раз использование дугового разряда в целях очистки поверхности металла от загрязнений было предложено в 70х годах учеными Института электроники им. У.А. Арифова в городе Ташкенте [33]. Воздействие вакуумного дугового разряда на поверхность металлического изделия — катода осуществляется в области катодных пятен (КП), формирующихся на его поверхности и создающих среду существования вакуумного дугового разряда. КП характеризуется малым временем существования ($\sim 10^{-4}$ s), высокой плотностью тока (10^9 – 10^{10}) А/м², выделяемой энергией порядка 10^{13} – 10^{12} Js⁻¹g⁻¹ и температурой $\sim (3-4) \cdot 10^3$ °К при размере катодного пятна $\sim 10^{-6}$ м. Процесс формирования новых КП взамен прекративших существование сопровождается их хаотическим перемещением по поверхности катода со скоростью до нескольких сотен метров в секунду в зависимости от состояния поверхности. Высокая концентрация энергии в быстро перемещающемся катодном пятне вызывает кратковременный, локальный разогрев поверхности в зоне его воздействия с последующим быстрым ее охлаждением, что способствует повышению механической прочности деталей, улучшению их антикоррозионных свойств и других свойств изделия, а также обеспечивает очистку поверхности от различных загрязнений. Осуществление очистки и обработки поверхности изделия и нанесение покрытий на основе вакуумного дугового разряда позволяет совместить эти процессы в одном технологическом цикле и тем самым реализовать комплексный подход к модификации поверхности металлических изделий, обеспечивающий высокую экономическую эффективность вакуумного дугового метода [34]. Использование вакуума при дуговой обработке обусловлено нагревом поверхности изделия в процессе обработки до высокой (~ 300 - 600°C) температуры, что приводит к ее повторному окислению, если в камере содержится кислород. На сегодня в России разработкой установок вакуумно-дуговой очистки поверхности металла занимается ЗАО «Петроплазма» г. Санкт-Петербург [35].

Главными недостатками вакуумно-дуговой очистки является необходимость в вакуумной камере, что удорожает и усложняет технологический процесс. Имеются ограничения по толщине обрабатываемого материала. Она должна быть не меньше (3-4)мм, поскольку при нагреве более тонкого материала возможно изменение его геометрической формы.

1.3 Предпосылки использования электроискрового разряда для очистки поверхности металла.

Все электрические методы рассмотренные в предыдущей главе имеют ряд недостатков и проблем которые приводят к усложнению технологического процесса очистки, его удорожанию и поэтому ограничивают область их применения. Но есть форма разряда, которая обладает практически теми же преимуществами, что и остальные электрические методы, но при этом позволяет исключить все недостатки присущие электрическим методам очистки поверхности стали. Это искра.

Если использовать электроискровую форму разряда как инструмент очистки металлических поверхностей, она будет иметь следующие существенные преимущества перед другими электрическими методами:

- позволяет производить обработку тонких материалов, поскольку не происходит перегрева поверхности в целом;
- не требует вакуумной системы, поскольку искра прекрасно горит при атмосферном давлении, а за счёт отсутствия разогрева всей поверхности не происходит ее повторного окисления;
- позволяет производить точечную обработку, то есть, нет необходимости обрабатывать всю деталь целиком;
- имеет широкий диапазон изменения параметров, что делает метод гибким и позволяет подбирать режим, необходимый для удаления тех или иных загрязнений;
- имеет довольно низкие энергетические затраты, высокий КПД, поскольку практически вся энергия, выделяющаяся в искровом разряде, идет на удаление загрязнений;
- не имеет твердых отходов, а работа в нейтральных газах делает метод экологически чистым;
- позволяет не только очищать, но и модифицировать обрабатываемую поверхность.

Что же позволяет говорить о том, что электрическая искра может использоваться в целях очистки металла?

Все без исключения методы очистки поверхности металла, рассмотренные в предыдущих параграфах, в процессе обработки изменяют геометрические размеры очищаемой поверхности, так как со слоем загрязнений уносится и слой чистого металла. Какие-то методы уносят больше (механические), какие то меньше (химическое травление), но в любом случае этот процесс неизбежен. Этот факт позволяет утверждать, что очистка поверхности металла и его

размерная обработка - схожие технологические процессы. Одной из самых распространенных технологий размерной обработки, наряду с обработкой металла резанием, является электроискровая обработка или электрическая размерная обработка.

В настоящее время в той или иной степени распространение получили следующие виды электрической размерной обработки материалов [36]:

- Электроискровая обработка;
- Электроконтактная обработка;
- Электрогидравлическое формообразование.

Физическая природа электрических методов обработки определяет их технологические возможности. Так, например в электроискровой и электроконтактной обработке носителем энергии является электрический ток, а обрабатываемая деталь и электрод инструмент включены в электрическую цепь. Но если в электроискровой обработке унос или прирост материала есть следствие эрозии электродов под действием искрового пробоя, то в контактной обработке электрический ток играет роль размягчителя материала заготовки, а унос материала уже осуществляется механически. В связи с этим электроискровая обработка позволяет убирать или наращивать слои материала от долей миллиметра до долей микрометра. В то время как электроконтактная обработка способна убрать минимальный слой ~1мм. В электрогидравлическом формообразовании носителем энергии является ударная волна в жидкости, возбужденная импульсным ударом. Придание формы изделию происходит в результате пластической деформации.

Из всех перечисленных видов размерной обработки ближе всего к очистке лежит электроискровая обработка. Электроискровая обработка делится на два вида:

- электроэрозионная обработка;
- электроискровое легирование.

Электроэрозионная обработка применяется для удаления загрязняющего материала с поверхности обрабатываемой детали, электроискровое легирование применяется для модификации поверхностного слоя за счет изменения структуры поверхностного слоя и нанесения на него тонкого слоя другого материала.

Электроискровая обработка была открыта супругами Лазоренко в тридцатых годах двадцатого столетия. В результате своих исследований они сделали ряд обобщений [37], которые послужили появлению и развитию множества технологий, имеющих в основе искровой разряд. Данные обобщения основывались на большом числе исследований и анализе вольт-амперной характеристики электрических процессов, протекающих между двумя неподвижными электродами при атмосферном давлении:

1. Любая самостоятельная форма электрического разряда в газах сопровождается эрозией действующих электродов.

2. Электрическая эрозия — неотъемлемое свойство любых токопроводящих материалов; другими словами, нет, и не может быть не эродирующих токопроводящих материалов.

С момента открытия сделанного супругами Лазоренко, электроискровая обработка получила применение в разных отраслях промышленности. В настоящее время мировой рынок электроискрового оборудования делят 4 компании — лидера отрасли: японские SODICK и MITSUBISHI ELECTRIC, а также швейцарские AGIE и CHARMILLES. О популярности этой технологии говорит, в частности, и тот факт, что в мире сегодня выпускается более 20 000 единиц электроискровых станков различного класса и уровня сложности [38].

1.3.1 Электроэрозионная обработка.

Электроэрозионная обработка — она же размерная обработка — получила свое распространение благодаря двум особенностям этого процесса:

- 1) простота получения искровой формы разряда;
- 2) исключительная легкость управления интенсивностью процесса обработки, позволяющая либо «обрушивать» на место обработки потоки мощных разрядов, грубо удаляющих порции металла по строго заданным направлениям, либо заставлять искру проводить «ювелирную» работу [39-42].

Схема электроискровой обработки представлена на Рисунке 1.

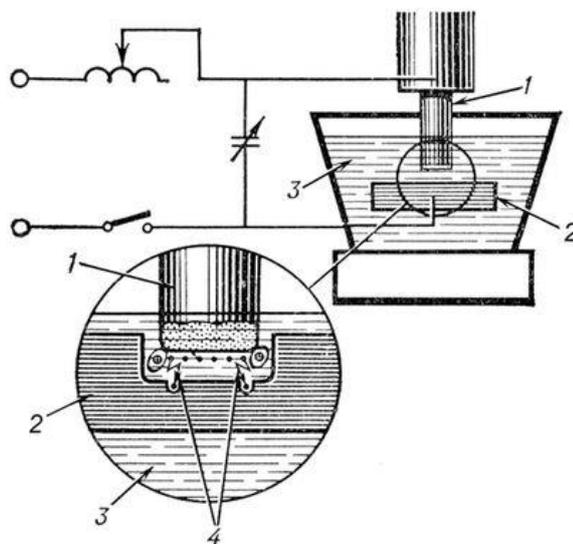


Рисунок 1. Схема электроискровой обработки; 1 — инструмент; 2 — заготовка; 3 — жидкий диэлектрик; 4 — электрические разряды.

Суть метода электроэрозионной обработки заключается в том, что между деталью и электродом инструментом инициируется электрический пробой, представляющий высококонцентрированный в пространстве и во времени импульс электрической энергии. При этом под действием этого импульса происходит нагрев расплавление и испарение материала поверхности. Это приводит к выбросу материала электродов в межэлектродное пространство и удаление его посредством прокачки рабочей среды. В качестве рабочей среды в электроэрозионной обработке используется жидкость. Рабочая жидкость должна обеспечивать термическую стабильность физико-химических свойств, при воздействии электрических разрядов, низкую коррозионную активность к металлам электродов, высокую температуру вспышки и низкую испаряемость, хорошую фильтруемость, низкую токсичность, экологическую безопасность, не иметь запаха [43].

Как было сказано выше рабочим инструментом при электроискровой обработке является искровой пробой или конденсированная искра. Конденсированная искра представляет собой импульсный разряд конденсатора на межэлектродный промежуток. Разряд начинается в результате пробоя межэлектродного промежутка. Разряд в эрозионной обработке может длиться от 1 мкс до 1,5 мс [44], температура в разряде может достигать величины 10000-30000°С [45]. При этом процессы в искре не являются стационарными и не могут быть описаны законами, справедливыми для дугового разряда. Многие ученые пытались при помощи теории и практики описать процессы, происходящие в электрической искре [46,47]. Для коротких

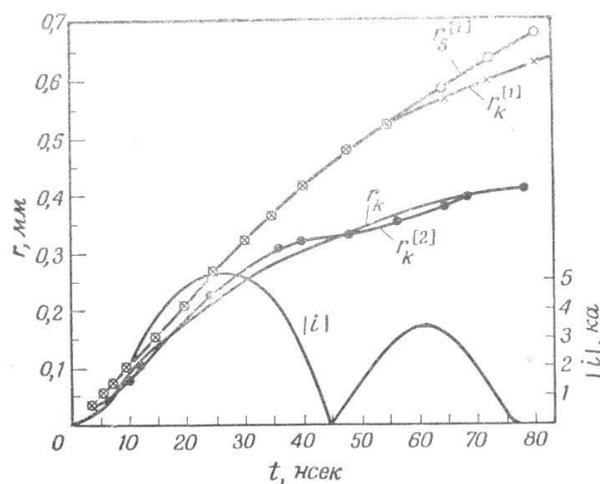


Рисунок 2. Зависимость радиусов ударной волны в канале в воздухе от времени. r_k — экспериментально определенная величина радиуса канала по Андрееву, Ванюкову [50], $r_k^{[1]}$ — радиус канала по Драбкиной, $r_s^{[1]}$ — радиус ударной волны по Драбкиной, $r_k^{[2]}$ — радиус канала по Брагинскому.

импульсов математически это лучше всего удалось сделать отечественным ученым Драбкиной И.С. [48] и Брагинскому С.И. [49]. Если модель Драбкиной И.С. справедлива только для начальной стадии искрового канала, так как основные уравнения выведены для высоких давлений, то модель Брагинского С.И. является ее усовершенствованием. На Рисунке 2 приведены экспериментальные и теоретические зависимости радиусов ударной волны и канала в воздухе от времени.

Благодаря проведенным исследованиям с фотографированием искрового канала [51] и математическим моделям можно выделить несколько стадий развития искрового канала в газе. На первой стадии канал очень узкий, в нем идут процессы нарастания тока вследствие уменьшения сопротивления канала и, как результат, повышается температура [52,53]. Затем наблюдается расширение канала и образование ударной волны. На следующей стадии ударная волна отделяется от канала и продолжает двигаться с большой скоростью, канал же расширяется, но с меньшей скоростью. На третьей стадии горячий стержень канала исчезает вследствие отсутствия тока и деионизации искрового промежутка. Этапы развития канала показаны на рисунке 3.

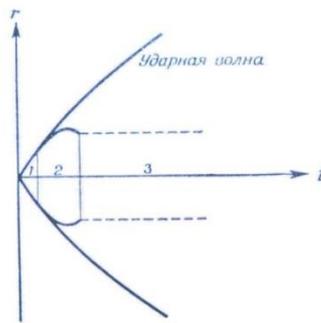


Рисунок 3. Схема развития искрового канала.

Исключительной особенностью искрового разряда в газе является то, что в нем можно добиться плотности тока порядка 10^5 А/см^2 и пиковой мощности 10^8 Вт . А поскольку разряд имеет бочкообразную форму [54] и то плотность тока на аноде и на катоде примерно одинакова (Рисунок 4) .

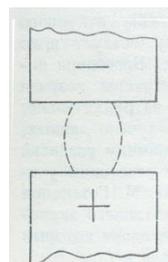


Рисунок 4 Схематическое изображение электроискрового канала.

Совокупность выше описанных особенностей искрового разряда приводит к тому, что в момент пробоя межэлектродного промежутка на поверхности электродов происходит разогрев материала до высокой температуры и как следствие его расплавление и сублимация. Расплавленный металл под действием ударной волны выбрасывается с поверхности, в результате чего образуется эрозионный кратер (лунка) [55]. Причем, как было показано в работах Золотых Б.Н., материал электрода удаляется с поверхности не только в расплавленном и газообразном состоянии, но и виде твёрдых частиц оторванных из области, прилегающей к зоне воздействия искрового канала, в результате механических напряжений возникающих при распространении ударной волны.

Количество материала унесенного с поверхности обрабатываемого электрода зависит от многих факторов таких как: материал электрода, форма импульса напряжения и т.д.. Многочисленные исследования показали, что можно подобрать такие условия обработки, при которых будет эродировать только один электрод [56], а количество материала, уносимое серией импульсов, прямо пропорционально количеству материала уносимого одиночным разрядом [56] при прочих равных условиях.

На сегодняшний день государственным стандартам (ГОСТ 25331-82) регламентированы следующие виды электроэрозионной обработки:

- Электроэрозионное объемное копирование – при этой обработке на поверхности электрода-заготовки отображается форма поверхности электрода-инструмента.
- Электроэрозионное прошивание - при этой обработке электрод-инструмент, углубляясь в электрод заготовку, образуя отверстие постоянного сечения;
- Электроэрозионное маркирование ;
- Электроэрозионное вырезание – электрод-инструмент (в виде непрерывно перематываемой проволоки) осуществляется обход заготовки по заданной траектории, образуя поверхность заданного контура;
- Электроэрозионное отрезание;
- Электроэрозионное шлифование ;

Электроэрозионная обработка может выполняться в комбинации с другими видами обработки, например: электроэрозионно-химическая обработка [56] или электроэрозионно-абразивная обработка [57].

Электроэрозионную обработку можно разделить на три режима:

- черновой режим;
- чистовой режим;
- доводочный режим.

В таблице 1 приведены параметры, характеризующие эти режимы.

Таблица 1. Параметры режимов обработки.

Режим	Мощность, кВт	Длительность импульса, мкс	Частота, Гц	Производительность, мм ³ /мин	R _z , мкм
Черновой	3-30	10-10000	30-3000	100-30000	80-320
Чистовой	3-5	20-5000	1000-10000	30-200	20-40
Доводочный	1	<20	<3000	<30	0,1-2,5

Исследователи метода электроэрозионной обработки вывели формулы, связывающие такие параметры, как шероховатость и производительность процесса в зависимости от энергии импульса и параметров эрозионной луки.

С момента открытия электроэрозионного метода обработки металла в этой области проведены обширные исследования, но, несмотря на это, использование электроискровой обработки для очистки поверхности металла от различного рода загрязнений не удастся по нескольким причинам:

- использование в качестве рабочей среды жидкости усложнит технологию очистки, особенно когда необходимо удалять загрязнения с металла проката большой площади;
- при электроэрозионной обработке межэлектродный промежуток составляет от полмиллиметра до единиц микрометра, что затруднит обработку с неравномерными загрязнениями (ржавчина), поскольку может приводить к короткому замыканию контактов. Также неровность листов металла может приводить к нежелательному результату очистки;
- в литературе отсутствуют данные о том, как влияют диэлектрические пленки загрязнения (окалины, ржавчины, масла и т.д.) на процесс обработки металла.

1.3.2 Электроискровая модификация поверхности.

Известно [58-64], что при воздействии искрового канала на поверхность в результате переноса материала одного электрода на другой в поверхностном слое происходят физико-химические изменения обрабатываемого материала, что приводит к изменению свойств материала. На основе этого эффекта получила распространение технологическая операция под названием электроискровое легирования поверхности металла.

В настоящее время электроискровое легирование используется для:

- увеличение твердости, коррозионной стойкости, а также износо- и жаростойкости;
- снижение способности к схватыванию поверхности при трении;

- восстановление размеров инструмента, деталей машин и механизмов;
- изменение электрических свойств контактирующих элементов и эмиссионных способностей поверхности;
- создание на рабочей поверхности переходных слоев определенной шероховатости.[65]

Процессы, происходящие при электроискровой модификации поверхности схожи с процессами размерной электроискровой обработки. Разница в условиях электроэрозионной обработки и электроискрового легирования заключается в том, что процесс легирования происходит в газе, при очень малых промежутках (при замыкании электродов), без выброса материала в межэлектродный промежуток, а с осаждением его на одном из электродов [66].

На рисунке 5 приведена принципиальная схема релаксационного генератора и картинка, демонстрирующая процесс электроискрового легирования.

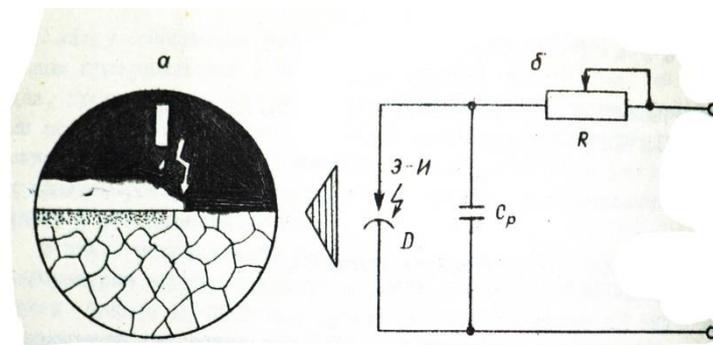


Рисунок 5 Процесс электроискрового легирования (а) и принципиальная схема генератора предназначенного для формирования импульсных разрядов.

Процесс электроискрового легирования осуществляется следующим образом – при сближении электрода-инструмента с деталью и при расстоянии между ними равном или меньшем пробивному происходит пробой межэлектродного промежутка и разряд емкости на контур. Заканчивается разряд уже при замкнутых электродах. За счет передаваемой энергии из накопительной емкости на поверхности металла происходит разогрев, плавление, испарение материалов, приводящие к эрозии электродов. В результате чего происходит перенос материала с электрода-инструмента на электрод-деталь, обеспечивая формирование на последнем слоя с определенными физико-химическими свойствами [67].

На сегодня существуют как ручные, так и механизированные станки для электроискрового легирования. При использовании ручных установок для чистового легирования производительность обработки составляет $0,5-3 \text{ см}^2/\text{мин}$ при этом высота шероховатость поверхности $R_z = 2,5-80 \mu\text{м}$, а толщина формируемого покрытия составляет $0,01-0,12 \text{ мм}$. Если

использовать грубый ручной режим то производительность процесса составит 2-8 см²/мин при этом минимальная шероховатость составляет 80мкм. А толщин слоя 0,1-0,2мм и выше.[68]

Механизированные и автоматизированные станки позволяют наносить качественные слои с шероховатостью $R_a = 0,35-0,6$ мкм с производительностью до 3 см²/мин.[69]

Данные об электроискровом легировании говорят о том, что процессы происходящие при очистке поверхности металла от загрязнений могут проходить с теми же закономерностями. Однако говорить о точном совпадении не приходится, это связано в первую очередь с разными условиями обработки, а именно межэлектродный зазор в случае электроискрового легирования составляет единицы десятки микрометров, в то время как зазор при электроискровой очистке должен находиться в пределах 0,5мм - 3мм.

1.3.3 Выбор материала электрода и полярности импульса напряжения.

Очень важным вопросом при любой электроискровой обработки является выбор материала электрода инструмента, а также полярности импульса напряжения. Эти параметры влияют на массоперенос материала одного электрода на другой [70-73].

В общем случае одним из важных условий направления эрозии электродов играет «полярный эффект» впервые описанный Б.Р. Лазаренко [44]. На основе экспериментальных данных он сделал вывод, что по величине эрозия анода превосходит эрозию катода. Но исследования, проводившиеся позже показали, что для большинства электродов справедливы следующие соотношения: если температура плавления катода больше или равна температуре плавления анода, то эрозия анода будет преобладать над эрозией катода и наоборот, если температура плавления анода больше или равна температуре плавления катода, то эрозия катода будет идти интенсивнее.

Выразить это можно через критерий полярности [54]:

$$K_{\text{п}} = \frac{\gamma_{\text{к}}}{\gamma_{\text{а}}}$$

где $\gamma_{\text{к}}$ и $\gamma_{\text{а}}$ - соответственно эрозия катода и анода. Если $K_{\text{п}} < 1$, то полярность положительна, а если $K_{\text{п}} > 1$, то полярность отрицательна и переноса материала анода на катод не будет.

Это связано с тем, что $K_{\text{п}}$ зависит также от длительности и энергии импульсного разряда, а при разных материалах электродов - от их теплопроводности.

Одним из первых описал математически эффект эрозии электродов Л. С. Палатник. В своей работе он исследовал искровой канал с помощью измерения рентгеновского спектрометра, а также изучал поверхностный слой после обработки искрой [74]. Исследования

показали, что существует эффект полярности связан с концентрацией паров материала электродов. При этом концентрация паров материала анода больше, чем катода. Её можно описать соотношением $X_k/X_a = C_a \rho_a \lambda T^2 / C_k \rho_k \lambda T^2$, где X — концентрация паров; C — теплоёмкость; ρ — плотность; λ — коэффициент теплопроводности; T — температура кипения; а, к — индексы анода и катода соответственно. Палатник Л. С. предположил, что приведенное соотношение можно рассматривать как общий критерий полярности, если заменить температуру кипения в нём температурой плавления. Соотношение $K = C \rho \lambda T^2$ получило название критерия эрозионной стойкости Палатника [75].

Автор работы [36] (Золотых Б.Н.) пошел дальше и вывел выражение связывающее эффект полярности не только с теплофизическими константами материалов электрода, но и с элементарными процессами в канале разряда и на поверхности электродов:

$$K_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{к}}(\lambda, \tau_{\text{и}}, W_{\text{и}}) * g_{\text{а}}(T_{\text{пл}}, c, q_{\text{пл}})}{Q_{\text{а}}(\lambda, \tau_{\text{и}}, W_{\text{и}}) * g_{\text{к}}(T_{\text{пл}}, c, q_{\text{пл}})} \quad (1)$$

где: $Q_{\text{к,а}}$ — количество тепла, выделившегося в зоне разряда на аноде и катоде; $g_{\text{а,к}}$ — полная теплота фазового превращения единицы массы электродов; λ — коэффициент теплопроводности; $\tau_{\text{и}}, W_{\text{и}}$ — соответственно длительность и энергия импульсного разряда; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления; c — теплоемкость; $q_{\text{пл}}$ — скрытая теплота плавления.

Экспериментальные данные показывают, что помимо полярного эффекта [76,77], на явление переноса значительно влияют свойства газовой среды, величина межэлектродного промежутка, изменение свойств поверхности электродов в процессе взаимодействия импульсного разряда и т.п. Например, если на поверхности катода имеется тонкий слой жидкости, то картина переноса существенно отличается от той, которая наблюдается в тех же условиях при отсутствии такого слоя. Изменение же межэлектродного промежутка дает возможность установить оптимальное расстояние, при котором перенос становится максимальным. В работе [78] показано, что максимальный перенос материала электродов в воздухе при рабочем напряжении $U_{\text{р}}=200\text{В}$ и накопительной емкости $C_{\text{н}}=1200\text{мкф}$ наблюдался при межэлектродных расстояниях 8 - 15 мкм. За пределами этих значений эффект переноса снижается.

Влияние газовой среды на процесс переноса показано в [79,80]. В них установлено, что при изменении давления газа в межэлектродном промежутке в диапазоне $13,3 - 10^5 \text{ Па}$ наблюдается сложный характер изменения электрической эрозии и переноса материала анода на катод. А в

работе [81] авторы исследовали эрозию электродов при электроискровом легировании в разных газах и установили, что обработке в аргоне эрозия анода снижается по сравнению с воздухом.

Существует еще одна теория эрозии материала анода, связанная с бомбардировкой его электронами. В работах [82–84] авторы исследовали выделение энергии при торможении пучка электронов в твердом теле. Они показали, что проникающий в вещество электрон теряет свою энергию не сразу, а испытывает многократное рассеяние при соударениях с решеткой. Энергия электронов передается тонкому слою материала электрода (порядка 0,8-0,9 величины пробега электрона в данном материале). В результате этого тонкий слой материала анода вскипает. Высокое давление в данной области выбрасывает материал анода в направлении катода. При этом в продуктах эрозии могут содержаться и не оплавленные частицы материала. В [85] показано, что при искровой обработке даже легкоплавких материалов в продуктах эрозии содержатся частицы, являющиеся продуктами хрупкого разрушения.

Таким образом, большое число факторов, влияющих на полярный перенос, затрудняет однозначную формулировку общего критерия переноса. Детальные данные об этом процессе обычно уточняются экспериментальным путем.

На сегодня существует огромное количество работ, посвящённых изучению свойств материалов для электроискровой обработки материала [86-90]. Даже основано научное направление «Материаловедение электродных материалов для электроэрозионной обработки» [91]. Применительно к очистке металла электрической искрой электрод-инструмент должен быть выполнен из материала с высокой эрозионной стойкостью, быть доступным и недорогим. Анализ исследований, выполненных разными авторами, показал, что для обработки конструкционной стали самым подходящим материалом является вольфрам. В работах [92,93] приведены экспериментальные данные, отображающие объемный износ обрабатываемых электродов в зависимости от разных параметров. На Рисунке 6А и 6Б приведены зависимости износа обрабатываемых электродов из разных материалов и величины эрозии анода и катода от температуры плавления материала. Из графика следует, что самым минимальным износом обладает вольфрам.

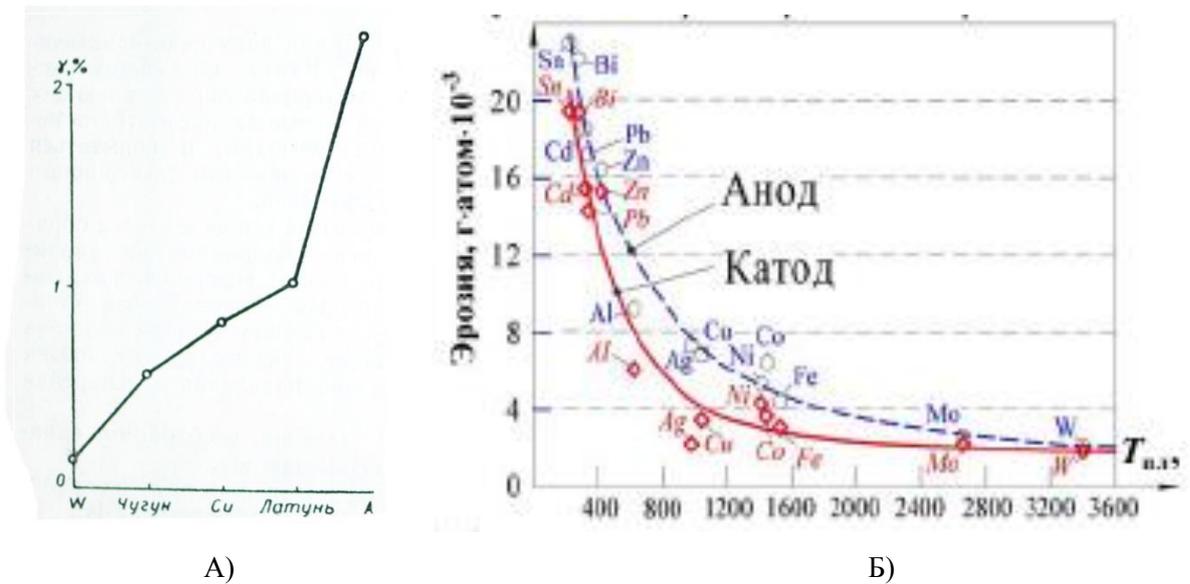


Рисунок 6 Зависимость относительного износа обрабатываемых электродов из разных материалов (А); зависимость величины эрозии анода и катода от температуры плавления материала (Б).

Как уже говорилось выше, эрозия электродов при прочих равных условиях так же будет зависеть от полярности электродов и формы импульса. Так, при униполярном импульсе можно добиться таких условий, при которых эрозия электрода-инструмента будет практически отсутствовать [94]. На сегодняшний день в установках для искровой обработки материалов используют различные формы электрических импульсов [95].

1.4 Обзор генераторов для формирования электрической искры.

С момента открытия искровых технологий были разработано и реализовано большое количество электроискровых установок с различными видами генераторов для формирования электрической искры [96-100]. Все генераторы для формирования искры по принципу работы можно подразделить на несколько групп:

1. Контактные или релаксационные генераторы;
2. Бесконтактные одноктактные генераторы;
3. Бесконтактные двухтактные генераторы.

Первая группа генераторов - самая распространённая, предложена для электроискровой обработки металла Б.Н. Лазаренко, обладает высокой надёжностью и простотой. Подобные генераторы имеют в своей структуре накопитель энергии, как правило, это конденсатор, и вибрационную или вращающуюся систему электродов. После включения генератора электроды

начинают поступательное движение друг к другу. Когда расстояние между электродами станет достаточным для пробоя межэлектродного промежутка, накопительный конденсатор разряжается. Но электроды обычно движутся до полного контакта друг с другом. В момент контакта накопительная емкость разрядится полностью. Далее электроды начинают движение в обратном направлении, а накопительный конденсатор в это время заряжается. Затем все процессы повторяются. Для ограничения разрядного тока в таких генераторах обычно используется сопротивление либо индуктивность, включенные в разрядную цепь. Пример самого простого релаксационного генератора приведен на Рисунке 7. На сегодняшний день разработано множество схемотехнических решений генераторов данного типа. Все модификации заключаются в различных конструкциях вибрационной системы. Релаксационные генераторы хорошо зарекомендовали себя благодаря своей простоте и надежности, но наряду с этим генераторы такого типа обеспечивают малую производительность процесса, их КПД не выше 40 процентов. Им присущи нестабильность амплитуды, длительности полярности, частоты и формы импульсов, поскольку эти параметры неразрывно связаны с состоянием межэлектродного промежутка. Релаксационные генераторы применяются в основном в установках электроискрового легирования и размерной электроискровой обработке.

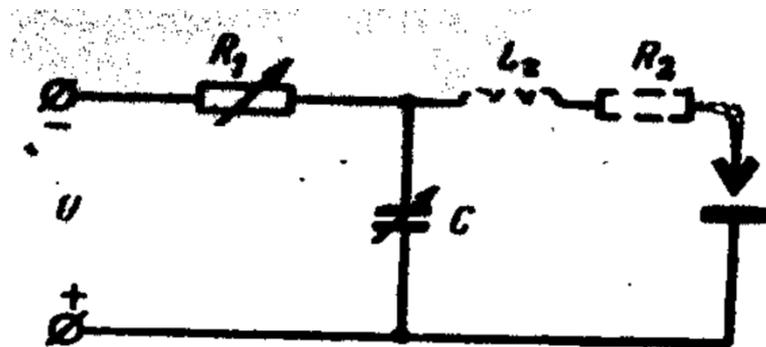


Рисунок 7. Схема генератора релаксационного типа.

Вторая группа генераторов, применяется в тех видах установок, где электродная система неподвижна. Для этого напряжение, прикладываемое к межэлектродному промежутку должно иметь значение заведомо выше пробивного напряжения. В таких генераторах импульс напряжения служит инициатором искрового пробоя и поставщиком энергии. Обычно эти генераторы используются в таких видах электроискровой обработке, где искровой промежуток составляет от единиц до сотен миллиметров, например: электроискровое бурение, штамповка искровым разрядом в жидкости и т.д. В качестве таковых применяются генератор Маркса [101], генератор импульсов тока, импульсные трансформаторы и их модификации и т.п. В качестве

примера на Рисунке показан генератор Маркса. Основное достоинство этих генераторов - независимость параметров импульса тока от состояния межэлектродного промежутка. К недостаткам этих генераторов можно отнести невысокий КПД, это связано с тем, что выходное сопротивление генератора, как правило, не согласовано с сопротивлением искры. В результате не согласованности разряд носит колебательный характер и невысокий КПД перекачки энергии. Как правило, все эти типы генераторов имеют невысокий ресурс работы и работают с частотой несколько раз в секунду.

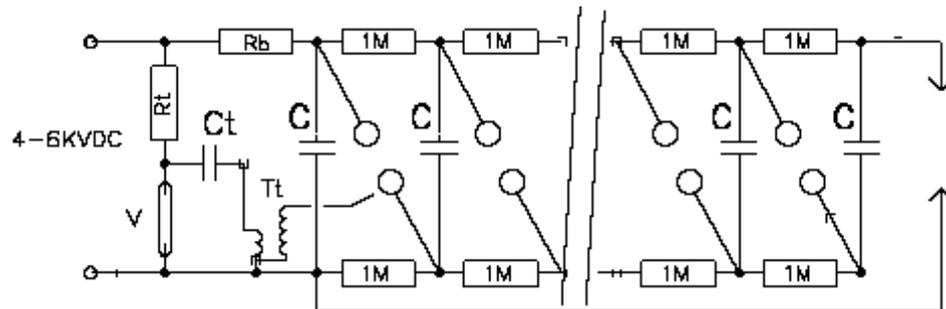


Рисунок 8. Генератор Маркса.

Третья группа генераторов, условно названная двухтактной, работает в два этапа. Для пробоя межэлектродного промежутка и формирования пробоя промежутка используются маломощный высоковольтный генератор, а для формирования сильноточных импульсов – мощный низковольтный генератор. Генераторы подключаются параллельно эрозионному промежутку и запускаются синхронно или с заданным сдвигом. Идея такой совместной работы двух генераторов была сформулирована еще в 1943г., а в 1960 – 1970гг. было предложено много схем, реализующих эту идею [101-103]. Высоковольтный «поджиг» промежутка, в генераторах для электроискровой обработки обеспечивает не только повышение КПД, но и расширяет его технологические возможности. Поскольку основной импульс тока, несущий основную энергию, абсолютно не зависит от процессов, происходящих в момент пробоя межэлектродного промежутка. Генератор с поджигающими импульсами приведен на Рисунке 9. Напряжение высоковольтного генератора U_a обеспечивает пробой электродного промежутка $ЭП$, а напряжение силового генератора $U_{c.2}$ обеспечивают передачу энергии в искровой канал. Транзистор $T_{c.2}$ открывается после пробоя $ЭП$. Для исключения шунтирования импульсов «поджига» низкоомным силовым генератором, поставлен разделительный диод D .

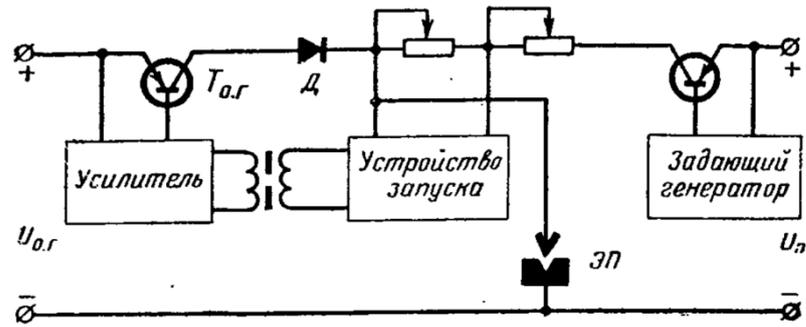


Рисунок 9. Источник питания для электроискровой обработки с двумя генераторами, работающими на одну нагрузку.

Подводя итог можно сказать, что генераторы первых двух групп, используемые в различных видах искровой обработки (эрозионная обработка, электроискровое легирование), имеют достаточно низкий КПД передачи энергии из генератора в искровой канал. У одних это связано с тем, что в разрядную цепь включен токоограничивающий резистор, который рассеивает на себе довольно большую часть энергии. Другие имеют плохое согласование выходного сопротивления генератора с сопротивлением искрового канала. Третьи содержат довольно большое количество ключевых элементов, что усложняет их конструкцию.

Самыми подходящим генератором для электроискровой установки по очистке металла являются генераторы третьей группы, которые обеспечивают пробой межэлектродного промежутка размером в несколько миллиметров, обладают большим ресурсом работы и дают возможность регулировать параметры токового импульса в широком диапазоне.

Выводы по главе:

1. На сегодняшний день в литературе отсутствуют данные по очистке поверхности металла от окалины при помощи электроискровой обработки.
2. Поскольку ни одна технологи электроискровой обработки поверхности металла не совпадает с разрабатываемой технологией электроискровой очистки, появляется необходимость создания электроискровой установки с варьируемыми параметрами.
3. Генератор импульсов должен быть выполнен по схеме с отдельный источник высоковольтных импульсов для формирования начального канала искры.
4. В качестве рабочего газа предпочтительней использовать аргон, поскольку он снижает эрозию электрода инструмента.
5. В качестве материала электрода-инструмента необходимо использовать вольфрам, так как поскольку он является одним из самых эрозионно-стойких материалов.
6. Использование униполярного импульса тока даст возможность подобрать режим обработки, исключая перенос материала электрода-инструмента на обрабатываемую поверхность.
7. В виду того, что нет определенного механизма эрозии поверхности электродов от различных параметров, необходимо провести исследования эрозии электрода инструмента применительно к очистке поверхности металла.
8. По причине отсутствия в литературе исследований по очистке поверхности металла от окалины электрической искрой необходимо исследовать процессы, протекающие на поверхности металла при электроискровой очистке.

Глава 2 (Методика проведения исследований)

В основе метода обработки поверхности металла лежит использование энергии электрического искрового разряда, формируемого между электродом и обрабатываемой поверхностью. При подаче импульса напряжения между электродом и очищаемой поверхностью формируется плазменный канал искрового пробоя с начальным диаметром $R_K \sim 0,1$ мм. Ток, протекающий по каналу, нагревает его, давления в канале повышается, канал расширяется. Температура плазмы достигает значений $3,8 \cdot 10^4$ °К, плотность потока энергии – $10^6 \dots 10^9$ Дж/м². Энергия плазмы канала, передаваемая поверхности, приводит к быстрому ($10^{-4} \dots 10^{-7}$ с) локальному разогреву, плавлению и испарению металла. На поверхности формируется микрократер радиусом R_K . Размеры микрократера (диаметр, глубина) зависят от энергии в импульсе и теплофизических характеристик материала.

2.1 Состав и принцип работы импульсной электроискровой установки

Для реализации электроискрового метода очистки поверхности стали, была разработана установка, внешний вид и структурная схема которой изображены на Рисунке 10. Особенности разработанной установки является применение схемы источника питания из двух генераторов работающих на один межэлектродный промежуток. При разработке установки заложены следующие требования к параметрам:

- регулируемая энергия в импульсе;
- регулируемая частота следования импульсов;
- регулируемый межэлектродный промежуток (0,3-4,0мм);
- униполярный импульс тока;
- высокий КПД;
- возможность смены рабочих газов;
- возможность обрабатывать металлическую пластину площадью 100см² и толщиной до 5мм;

Установка включает в себя следующие части:

- Вакуумная ювета;
- Электродная система;
- Система передвижения;
- Система измерения параметров обработки (осциллограф и датчик тока, высоковольтный делитель напряжения, нановакууметром);
- Источник импульсов тока.

- Вакуумная система (вакуумный насос, газовые баллоны с рабочим газом, газовые трассы, газовые краны)

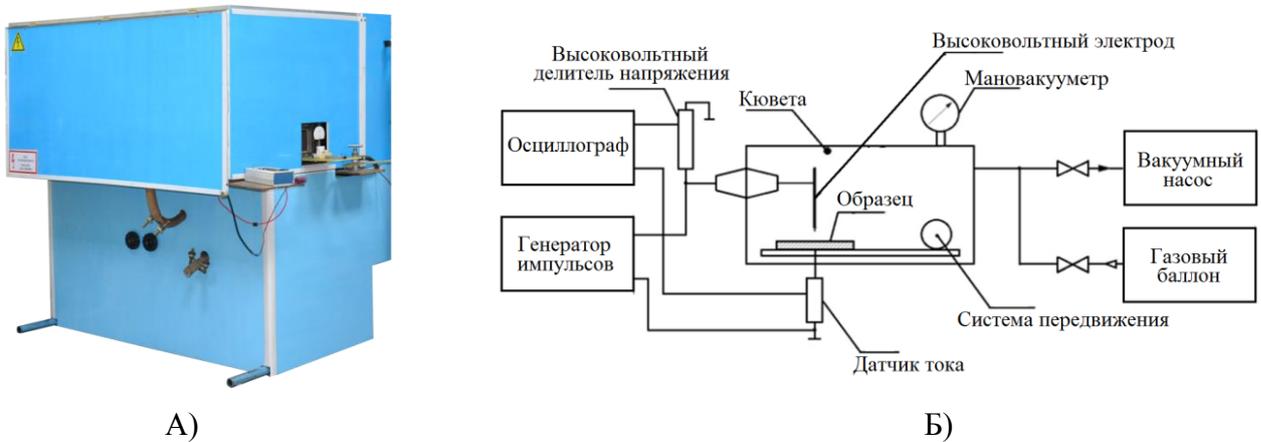


Рисунок.10. Внешний вид установки (А); структурная схема (Б) электроискровой установки.

Вакуумная кювета выполнена в виде прямоугольного бака из нержавеющей стали с размерами 400мм x 600мм x 200мм. Крышка кюветы изготовлена оргстекла. На стенках кюветы размещены: высоковольтный ввод; газовые патрубки для напуска и откачки газа; вводы под подключения датчиков вакуума; оптический ввод для проведения спектральных исследований; два кварцевых смотровых окна.

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 металлический стол системы передвижения (плоскость). Оба электрода изолированы от других частей установки, что позволяет менять полярность электродов.

В качестве системы передвижения образца используется координатный стол с двумя степенями свободы и изолированным столом. Движение координатного стола осуществляется двумя шаговыми двигателями, обеспечивающие точность позиционирования 2,5мкм. Размер зоны обработки -150мм x 250мм. Управление шаговыми двигателями осуществляется с помощью системы управления установки.

Для обеспечения откачки воздуха до давления 10^{-2} Торр используется пластинчатороторный форвакуумный насос НВР-5Д.

Основной особенностью электроискровой установки является генератор импульсов позволяющий достигать высокого КПД работы установки. Генератор импульсов изображен на Рисунке 11. В состав генератора входит три основных блока:

- низковольтная часть;
- высоковольтная часть;
- система управления.

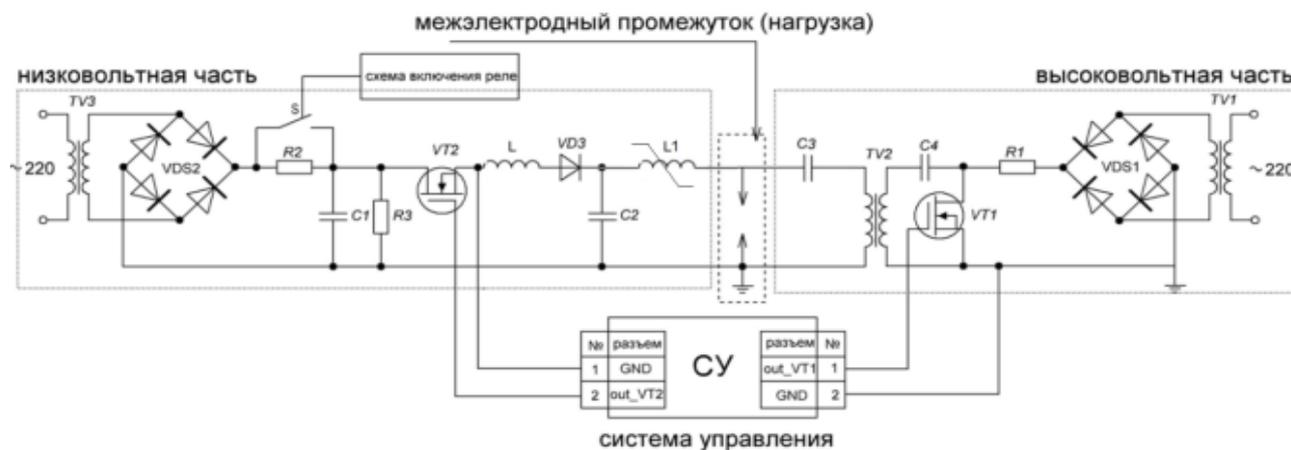
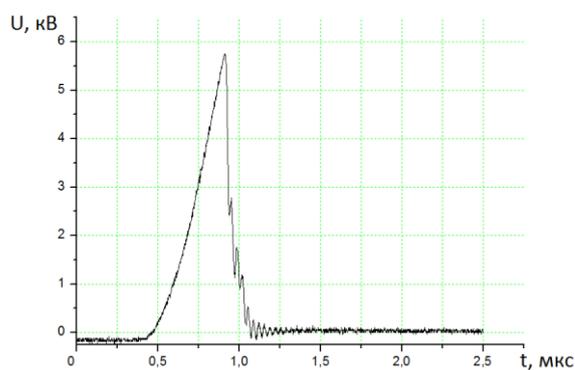
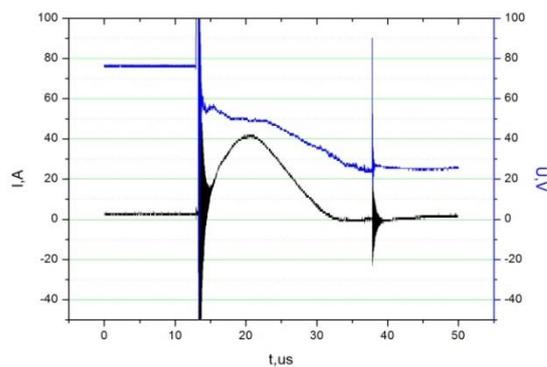


Рисунок 11. Функциональная схема генератора.

Высоковольтная часть генератора предназначена для формирования начального искрового канала. Для этого в первичной цепи трансформатора TV2 заряжается конденсатор C4 емкостью 220нФ до напряжения 300 В. При коммутации транзистора VT1 происходит разряд C4 на первичную обмотку трансформатора TV2 в результате на вторичной обмотке формируется импульс напряжения. Поскольку коэффициент трансформации равен 60 амплитуда импульса холостого хода - 18кВ, длительность- 1 мкс, энергия, запасаемая в C4 -0,01Дж (Рисунок 12А). Сформированный импульс напряжения позволяет создать начальный плазменный канал в газе атмосферного давления при максимальном расстоянии между электродами 5 мм.



А)



Б)

Рисунок 12. Осциллограммы тока и напряжения на искровом промежутке 2мм в воздухе атмосферного давления: А) высоковольтный импульс с пробоем межэлектродного промежутка; Б) осциллограммы тока и напряжения разряда накопительного конденсатора C2.

Низковольтная часть генератора служит для передачи энергии конденсатора C_2 в искровой канал для очистки поверхности стали. Конденсатора C_2 заряжается от C_1 при замыкании ключа VT_2 происходит через индуктивность L равную 108 мкГн . Заряд C_2 при емкости в 30 мкФ происходит за 180 мкс . Это позволяет работать на частоте до 5000 Гц . Поскольку емкость C_1 много больше емкости C_2 , напряжение на последней в два раза больше чем на C_1 . Разряд C_2 происходит после образования начального искрового канала (Рисунок 12Б).

Система управления генератора предназначена для синхронизации высоковольтной и низковольтной частей генератора путем управления транзисторами VT_1 и VT_2 . Схематично диаграммы управляющих импульсов показаны на Рисунке 13.

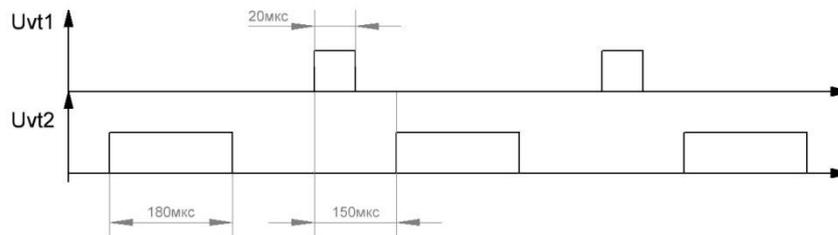


Рисунок 13. Диаграммы управляющих импульсов транзисторов VT_1 и VT_2 .

После включения генератора происходит заряд C_1 . Когда ее заряд составит 99% от максимума, система управления подает импульс, открывающий транзистор VT_1 . За время 180 мкс происходит заряд C_2 . Затем спустя определенный отрезок времени, который зависит от выбранной частоты работы генератора, открывается транзистор VT_1 разряжая C_2 на трансформатор TV_2 . Импульс напряжения на межэлектродном промежутке формирует начальный искровой канал через который разряжается C_2 , рассеивая свою энергию в канале. Перемагничивание трансформатора происходит в момент заряда C_2 . C_3 является разделительной, она пропускает через себя короткий высоковольтный импульс от высоковольтного трансформатора, но при этом не дает разряжаться C_2 через вторичную обмотку трансформатора TV_2 . Диод VD_4 (составной, с суммарным обратным напряжением 24 кВ и временем восстановления 80 нс) предназначен для защиты низковольтной части от высоковольтного импульса. Основные параметры установки приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные параметры электроискровой 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	5..100мкс
Запасаемая энергия	0.1..0.6Дж
Частота	0.1..5 кГц
Параметры установки	
Рабочие газы	Ag, N ₂ , H ₂ , воздух и др.
Область обработки	100мм x 100мм
Габаритные размеры	600мм x 600мм x 1300мм

Деталь, требующая обработки загружается в кювету и фиксируется на координатном столе специальными зажимами. Затем из камеры откачивается воздух. После того как остаточное давление в кювете достигает значения 10^{-2} Торр в нее напускают рабочий газ до давления 760 Торр (1 атм.). Затем с помощью системы управления задается область и параметры обработки. По окончании этого запускается генератор импульсов, одновременно с ним автоматически включается система передвижения. Начинается процесс обработки. По завершению обработки генератор выключается автоматически, и система передвижения возвращается в исходную точку.

Электрод движется над обрабатываемой поверхностью по траектории похожей на змейку (Рисунок 14), сканируя всю поверхность.

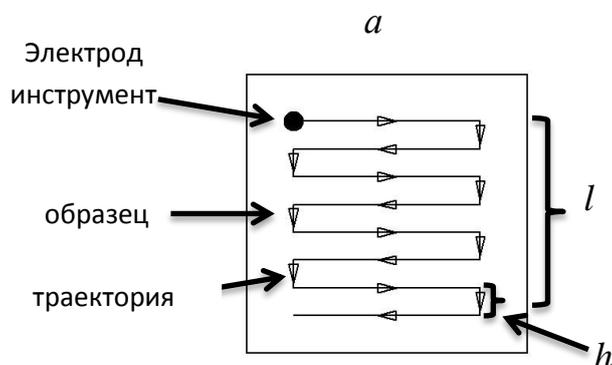


Рисунок 14. Траектория электрода-инструмента: a – ширина кадра; l – длина кадра; h – расстояние между строк.

Диаметр очищенной поверхности под электродом, при неподвижной системе передвижения, равен, как правило, утроенному межэлектродному промежутку [4]. В результате покрывая строго определенную площадь. Поэтому расстояния между строками следует выбирать таким образом, чтобы каждая последующая строка перекрывала предыдущую строку минимум на 25%.

Размеры области сканирования задаются при помощи системы управления. Возможные диапазоны скорости передвижения и области сканирования приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Параметры области сканирования.

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

Максимальный размер образца, который возможно обработать, для данной установки составляет 100мм x 100мм x 20мм.

2.2 Средства измерения электрических параметров установки

Осциллограммы тока и напряжения является важнейшими характеристиками для контроля параметров установки.

Поскольку весь процесс выделения энергии накопленной в генераторе в искру происходит за достаточно короткий промежуток времени $\sim 5\div 80$ мкс (для нашего случая), то для регистрации вольт-амперных характеристик необходимы датчики тока и напряжения с разрешающей временной способностью не менее 100нс.

Для измерения напряжение на межэлектродном промежутке использовались RC компенсированные делители. Схема такого резистора изображена на Рисунке 15.

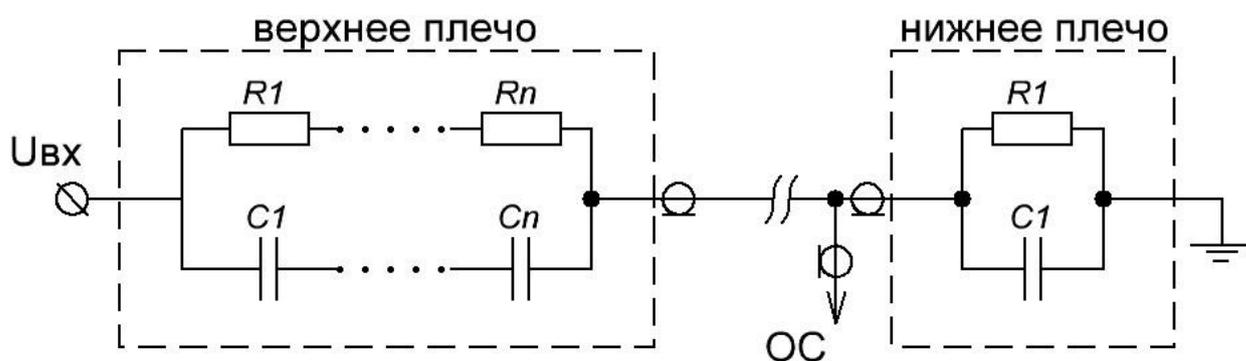


Рисунок 15. Схема делителя напряжения.

Резистивная часть делителя была собрана на низко индуктивных резисторах марки ТВО. Емкостная часть выполнялась с использованием керамических емкостей марки КВИ-2. Коэффициент деления равнялся 500. Общее сопротивление делителя составило 3,9 МОм. Емкость кабеля между верхним и нижним плечами учитывалась при расчете емкости верхнего плеча делителя. Общая емкость делителя составила 3 пФ. Нижнее плечо делителя располагалась непосредственно на осциллографе.

Для измерения тока искры использовался коаксиальный шунт с сопротивлением равным 0,2 Ом. Шунт, выполненный из нихромовой проволоки, диаметром 1,1 мм, уложенной бифилярно имеет индуктивность 1 нГн. Это позволяет измерять импульсный ток с периодом 30нс, так как индуктивное сопротивление шунта.

Осциллограммы токов и напряжений регистрировались осциллографом Tektronix 2022С с последующей обработкой в пакете программ OriginPro 8.

При расчете делителя напряжения, в расчет бралась погрешность измерительного прибора E7-22, позволяющего измерять емкость и сопротивление с точностью $\pm 0,7\%$. Разрешающая

способность делителя напряжения, во временной области, определялась при помощи подачи на него сигнала прямоугольной формы заданным фронтом. В качестве источника сигнала служил генератор сигналов произвольной формы Agilent Technologies 33250A. Меняя длительность фронта задающего импульса, отслеживался момент начала его искажения на выходе делителя. Для данного делителя напряжения разрешающая способность составила 10нс. На временах меньших этого наблюдаются искажения сигнала.

2.3 Расчет потерь энергии генератора при обработке поверхности образцов.

Коэффициент полезного действия установки рассчитывался по следующему выражению:

$$\eta = \frac{P_i}{P} * 100\% \quad (2)$$

где: η - коэффициента полезного действия;

P_i – мощность выделяющаяся в искровом канале в результате разряда накопительной емкости низковольтной части генератора (полезная мощность);

P – полная мощность установки потребляемая из сети.

Полная мощность генератора, потребляемая из сети, складывается из полезной мощности и мощности рассеиваемой на элементах схемы (потери):

$$P = P_i + P_{\text{пот}} \quad (3)$$

Мощность потерь складывается из:

- потери мощности в низковольтной части;
- мощности потребляемой высоковольтной частью и мощности расходуемой на формирование начального искрового канала;
- средней мощности потребляемой системой управления.

Средняя мощность рассеиваемая в низковольтной части равна:

$$P_n = P_v + P_{c1} + P_{vt} + P_{vd} + P_{c2} + P_l \quad (4)$$

где: P_v – мощность рассеиваемая на диодах мостового выпрямителя = 1 Вт

P_{c1}, P_{c2} – мощность потерь конденсаторов C1 и C2, соответственно = 0,188 Вт, 0,377 Вт

P_l – мощность потерь в дросселе L1 = 2 Вт

P_{vt} – средняя рассеиваемая мощность в транзисторе VT2 = 7,8 Вт

P_{vd} – средняя мощность рассеиваемая на защитном диоде VD3 = 2,97 Вт

Итого мощность рассеиваемая в низковольтной части равна 14,3 Вт. Расчет значений мощности проводилось для режима с максимальными энергозатратами (частота следования импульсов 5000 Гц, запасаемая энергия 0,6 Дж).

Мощность, потребляемая высоковольтной частью генератора максимальна на частоте работы установки 5000 Гц. И складывается из мощности потерь на элементах схемы, а также из мощности необходимой на формирование начального канала. Мощность - затрачиваемая на формирования канала с частотой 5000 Гц равняется 50 Вт, а мощность - рассеиваемая на дискретных элементах – 5,2 Вт. В сумме высоковольтная часть потребляет из сети среднюю мощность 55,2 Вт.

Система управления питается от источника вторичного питания мощностью 1 Вт.

Суммарная мощность потерь установки, составила 70,5 Вт или другими словами энергия, затраченная на нагрев элементов схемы и питания вспомогательных узлов, за период 14 мДж при частоте следования импульсов 5000 Гц. Это составляет 2,3% от энергии - запасаемой в низковольтной части генератора.

Расчет коэффициента полезного действия, передачи энергии накопленной, в низковольтной части генератора, в искровой разряд рассчитывался по выражению:

$$\eta_r = \frac{W_c}{W_i} * 100\% \quad (5)$$

где: W_c – энергия, накопленная в низковольтной части генератора;
 W_i – энергия, выделяющаяся в искровом канале.

Поскольку накопителем энергии низковольтной части генератора служит емкость C_2 расчет энергии в ней производился по следующей формуле:

$$W_c = \frac{C_2 * U_c^2}{2} \quad (6)$$

где: C_2 – емкость накопительного конденсатора;
 U_c – напряжение на накопительном конденсаторе.

Энергия, выделяющаяся в искровом канале, рассчитывалась путем графического интегрирования. Каждая из осциллограмм разбивается на 25000 точек, что делает данный подсчет достаточно точным.

Расчет энергетических затрат на обработку поверхности образцов производился по выражению:

$$W = \frac{\left(\frac{a * l}{h} + l\right)}{v} * f * W_i \quad (7)$$

где: a – ширина кадра;
 l – длина кадра;
 h – расстояние между строками;
 V – скорость движения электрода инструмента над поверхностью;
 f – частота следования импульсов.

Первый член выражения 3 показывает, какое время необходимо затратить на обработку площади $a \times l$. Умножив, это время на количество импульсов в секунду и энергию в одном импульсе получим энергию необходимую для обработки заданной площади.

2.4 Объекты исследования, характеристика модифицированной поверхности.

В работе объектом исследований выступала сталь 08КП. Это низкоуглеродистая кипящая сталь, широко используется в автомобильной и других отраслях промышленности.

С целью изучения механизма удаления окалина, на образцы размером 10x10мм наносилась оксидная пленка. Для получения тонких пленок образцы отжигались в муфельной печи при температуре 310 градусов в течении 10 минут, в результате получалась оксидная пленка толщиной 0,1мкм. Толстые пленки толщиной 10 мкм получались в результате отжига при температуре 600 °С в течении 15 мин. Отжиг проводился в воздухе при атмосферном давлении. После отжига образцы охлаждались на подложке с низким коэффициентом теплопроводности. Перед нанесением оксидной пленки образцы шлифовались на плоскошлифовальном станке с двух сторон. Исходная шероховатость поверхности составляла $R_z = 7$ мкм.

Подготовка поперечных шлифов.

Изучение микроструктуры и толщины оксидной пленки, а также структуры стали до обработки и после производились на поперечных шлифах. Для подготовки поперечных шлифов образцы разрезались и заливались эпоксидной смолой, а затем шлифовались на шлифовальной бумаге и полировались с использованием алмазной пасты разной зернистости. Разрезание выполнялось с помощью отрезного станка «ABRASIMET». Шлифовка и полировка поперечных шлифов выполнялась с помощью шлифовально-полировальной машины LaboForce-3 фирмы Srruers. Для предотвращения перегрева образцов и изменения структуры в рабочую область подавалась охлаждающая жидкость. Для выявления микроструктуры выполнялось химическое травление поперечных шлифов в 5% растворе азотной кислоты (HNO_3) [104].

Профилометрия.

Для изучения морфологии сформированной поверхности производились измерения ее шероховатости исследовалась с применением бесконтактного оптического 3D-профилометра MICRO MEASURE 3D station, французской фирмы STIL.

Весовые измерения.

Для изучения переноса массы материала с одного электрода на другой производился замер массы образцов до и после обработки на весах с точностью до 10мкг. Для снижения ошибки измерения каждый образец измерялся десять раз, а затем рассчитывалось среднее значение. Ошибка при этом составила 2% от измеренного значения.

Рентгеноструктурный анализ.

Фазовый состав исследуемых образцов определялся на основе рентгеноструктурного анализа (РСА). В основе этого метода лежит тот факт, что каждая фаза характеризуется определенным, присущим только ей, расположением атомов в кристаллической решетке, а, следовательно, и уникальным набором межплоскостных расстояний. Близкие значения межплоскостных расстояний и длин волн рентгеновского излучения позволяют рассматривать кристаллическую решетку материала как дифракционную решетку для рентгеновского излучения.

Исследования проводились в фокусировке Брэгга-Брентано, в которой при повороте образца на угол θ детектор поворачивается на угол 2θ . Фазовый анализ проводился при съемке со скоростью детектора 2 градуса в минуту в диапазоне углов дифракции $2\theta = 20\text{--}100$ градусов. Регистрация интенсивности дифрагированного рентгеновского излучения проводилась с шагом 0,02 градуса, в результате чего относительная погрешность определения межплоскостных расстояний в зависимости от угла дифракции составляла 0,1 – 0,3 %.

Математическое разложение дифракционных линий осуществлялось с помощью математического пакета ORIGIN 7.0 при аппроксимации каждой линии профилем Гаусса.

Растровая электронная микроскопия.

С целью получения изображения обработанной поверхности, микроструктуры и определения элементного анализа использовалась растровая электронная микроскопия (РЭМ).

Принцип действия растрового электронного микроскопа основан на эффектах, возникающих при облучении поверхности объектов сфокусированным пучком электронов. Для получения РЭМ-изображений поверхности в основном используются вторичные и отраженные электроны. Отраженные электроны образуются в результате упругого рассеяния первичных электронов на атомах исследуемого образца. Основным фактором, влияющим на количество отраженных электронов, является элементный состав области детектирования. Участки анализируемой поверхности, содержащие атомы с более высоким значением порядкового номера, дают более светлые участки на изображении вследствие более интенсивного отражения электронов. Вторичные электроны образуются в результате ионизации атомов вещества, и их энергия не превосходит 50 эВ, генерация вторичных электронов осуществляется в слое, толщиной до 10 нм. Изменение наклона участков поверхности вызывает изменения в выходе вторичных электронов. Этот эффект используется для получения информации о топографии поверхности. В данной работе для исследования морфологии поверхности образцов

использовался растровый электронный микроскоп LEO1455VP со следующими режимами работы: ускоряющее напряжение 20 кВ; ток зонда $5 \cdot 10^{-7}$ А.

Выводы по главе:

- Генератор обеспечивает возможность работы с энергиями 0,1Дж - 0,6Дж на частотах до 5000Гц с потерями энергии в генераторе не более 3% от накопленной.
- Установка позволяет обрабатывать токопроводящие образцы размером до 89мм x 89мм x 20 мм, с межэлектродным промежутком до 3мм. также имеется возможность смены полярности электродов.
- Диагностическое обеспечение установки позволяет обеспечить поредение измерений с необходимой точностью.

Глава 3 (Характеристики генератора)

3.1 Влияние энергии, запасаемой в генераторе и величины межэлектродного промежутка на вольт-амперные характеристики разряда.

Вольт-амперная характеристика разряда несет важную информацию в оценке работоспособности установки. На сегодняшний день в литературе много теоретических расчетов и экспериментальных данных, которые описывают изменения тока и напряжения в искровом разряде [101]. Показано, что большое влияние на форму тока и напряжения влияют начальные параметры генератора выходное напряжение и запасаемая энергия [99]. В большинстве случаев выходное напряжение генератора задается таким, чтобы обеспечить стабильный пробой межэлектродного промежутка. В результате сопротивление искры не согласованно с выходным сопротивлением генератора, что приводит к колебательному режиму тока и напряжения.

Для определения влияния энергии, запасаемой в генераторе на вольт-амперные характеристики разряда, проводились исследования осциллограмм тока и напряжения, рассчитывались сопротивление искрового промежутка и волновое сопротивление генератора.

Осциллограммы напряжения снимались с помощью высоковольтного делителя напряжения. Его верхнее плечо находилось в рабочей камере. Осциллограммы тока снимались с токового шунта, выполненного в виде коаксиальной системы проводников с общим сопротивлением 0,2 Ом. Измерение тока и напряжения производилось при запасенных энергиях 8 мДж, 40 мДж, 120 мДж и межэлектродных промежутках 0,5 мм, 1 мм, 1,5мм, 2мм, 2,5мм и 3мм.

Индуктивность разрядного контура определялась по формуле Томсона:

$$L = \frac{4\pi^2 t^2}{c} \quad (8)$$

где: C – накопительная емкость генератора; t – время нарастание импульса тока при нулевом сопротивлении нагрузки (закороченном межэлектродном промежутке). Все графические расчеты выполнялись в программе Origin 8.0.

На Рисунке 16 изображены осциллограммы основных параметров искрового разряда в зависимости от межэлектродного промежутка. Отметим, что осциллограммы и расчетные кривые приведены для случая, когда уже создан канал пробоя 1-ым высоковольтным генератором. Все диаграммы сняты для разряда с энергией в импульсе 40мДж. Из диаграмм тока (Рисунок 16А) видно, что при зазорах 0,5мм и 1мм амплитуда и скорость нарастания тока выше приблизительно в 2 раза, нежели при больших зазорах. Кроме того время разряда существенно короче примерно на 6 мкс. В свою очередь наклон спада напряжения практически

одинаков для всех зазоров (Рисунок 16Б). Формы кривых мощности и тока подобны друг другу. Если говорить о сопротивлении искры то на диаграмме (Рисунок 16В) хорошо видно, что при увеличении зазора кривая как бы смещается вправо по оси времени. С увеличением зазора увеличивается время спада сопротивления, но для зазоров 0,5мм и 1мм спад сопротивления одинаков.

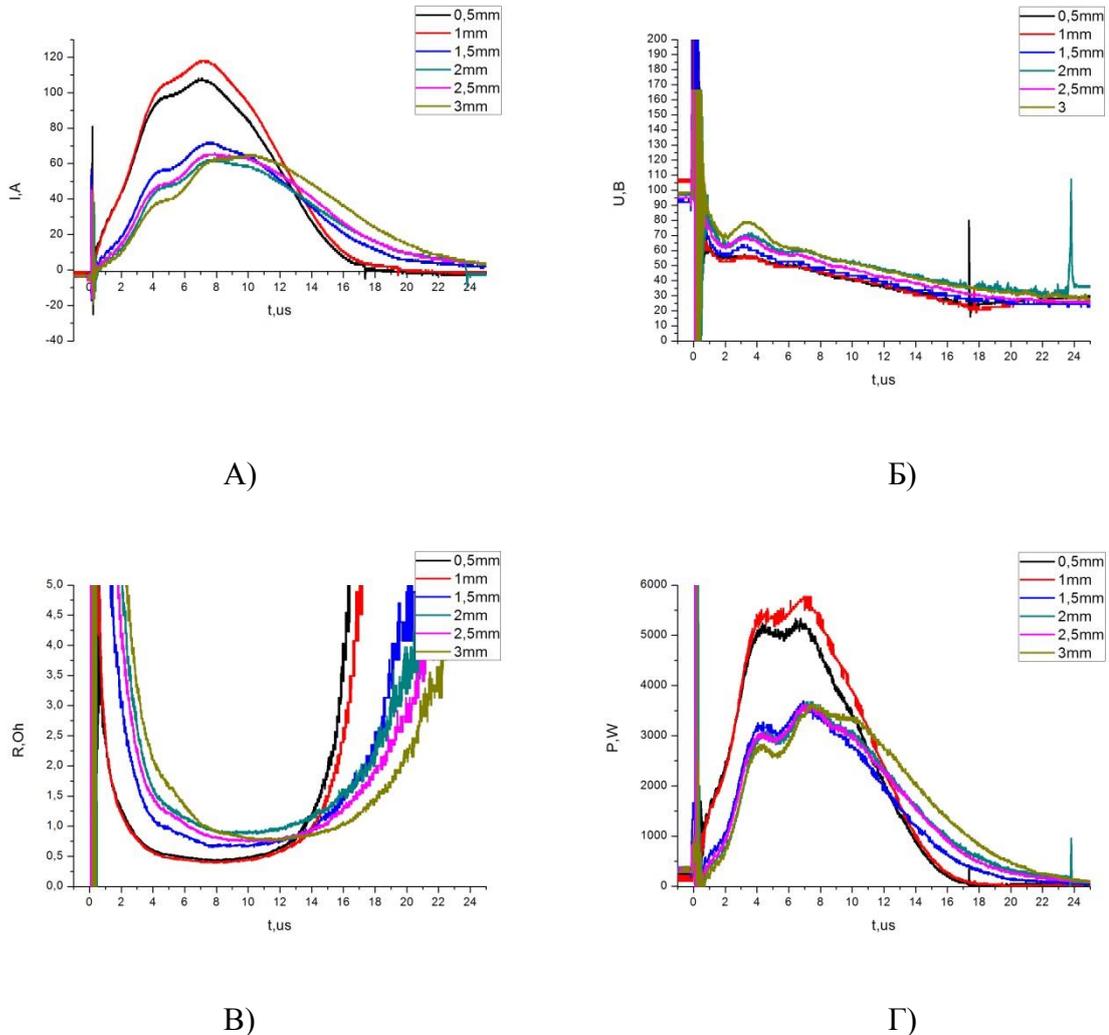


Рисунок 16. Основные характеристики разряда в зависимости от межэлектродного промежутка (энергия в искровом разряде $4,5\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$: А – ток; Б – напряжение; В – сопротивление; Г – мощность.

На диаграммах, показывающих зависимость изменения вольт-амперных характеристик от энергии, запасаемой в генераторе при неизменном межэлектродном промежутке (Рисунок 17) видно, что при увеличении энергии увеличивается длительность разряда. При этом скорости нарастания тока и мощности, а так же время спада величины сопротивления искры остаются

неизменными. Минимум сопротивления разряда приходится на максимум тока искрового промежутка.

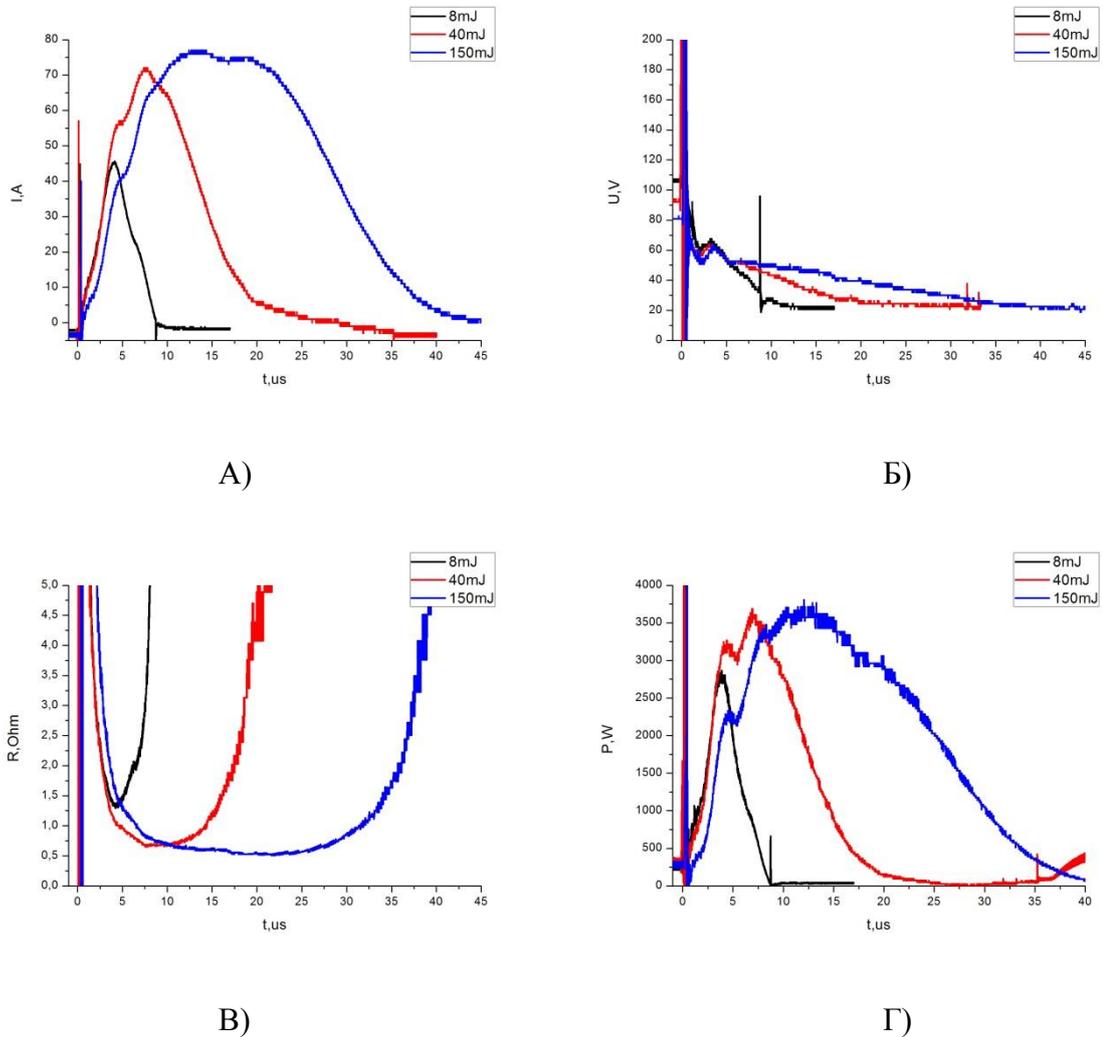


Рисунок 17. Основные характеристики разряда в зависимости от энергии запасаемой в генераторе (межэлектродный промежуток 1,5мм): А – ток; Б – напряжение; В – сопротивление; Г – мощность.

Таблица 4. Сопротивление искрового канала в максимуме тока.

Энергия, мДж	Сопротивление генератора, Ом	Сопротивления при разной 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

Значения волнового сопротивления генератора и значения минимальных сопротивлений в максимуме тока при различных энергиях и зазорах представлены в Таблице 4. Из таблицы можно сделать вывод, что сопротивление искры в максимуме токового импульса в два и более выше волнового сопротивления генератора. Это обусловлено низкой индуктивностью разрядного контура (величина индуктивности равна 0,2мкГн) и большой емкостью накопительных конденсаторов. Так же видно, что с увеличением энергии запасаемой в генераторе сопротивление уменьшается, а с ростом межэлектродного зазора увеличивается. Скачок увеличения сопротивления при зазорах больше одного миллиметра, возможно обусловлен тем, что при 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 сопротивлением плазмы формируемой в газе.

Из всего выше изложенного следует, что величина межэлектродного промежутка и энергия, накапливаемая в генераторе, влияют на вольт-амперные характеристики искрового разряда следующим образом:

- с увеличением межэлектродного промежутка растет сопротивление искрового канала в максимуме тока, а с увеличением энергии накапливаемой в генераторе уменьшается;
- при зазорах меньших 1мм сопротивление искры в максимуме тока минимум в два раза меньше чем при зазорах больших 1мм;
- чем больше межэлектродный промежуток, тем дольше сопротивление искры достигает минимума;
- при малых межэлектродных промежутках (до 1мм) на величину сопротивления искрового канала влияют, пары металла с поверхности электродов.

3.2 Влияния энергии накопленной в генераторе и межэлектродного промежутка на величину энергии выделенной в межэлектродном промежутке.

Одним из основных показателем эффективности обработки является затраты энергии на единицу площади обработанной поверхности. Для этого необходимо знать какая доля энергии накопленной в генераторе выделяется в искровом промежутке. Это можно определить как коэффициент полезного действия (КПД) процесса.

Много работ посвящено изучению параметров искрового разряда связывающих энергию разряда с ее параметрами [48,49]. Большие успехи достигнуты в изучении наносекундных разрядов, для них выведены математические выражения, которые удовлетворительно совпадают с данными, полученными экспериментально. Но КПД зависит не только от процессов, протекающих в разрядном контуре, а также от системы, которая заряжает накопительную емкость, поскольку в большинстве случаев она представляет собой RC – генератор, который рассеивает на себе до половины энергии, запасаемой в накопительном конденсаторе [101].

КПД процесса определялся отношением энергии, выделившейся в искровом канале, к энергии, запасенной в накопительной емкости генератора. Энергия, затраченная на заряд накопительной емкости в расчетах не учитывалась поскольку составляет не более пяти процентов от общих затрат (см. Методику эксперимента). Энергия, выделившаяся в искровом канале, рассчитывалась двумя способами: (1) интегрированием произведения тока и падения напряжения на искре и (2) определением разницы между энергией, накопленной в конденсаторе и энергией, оставшейся в нем после завершения разряда.

Результаты представлены на Рисунке 18.

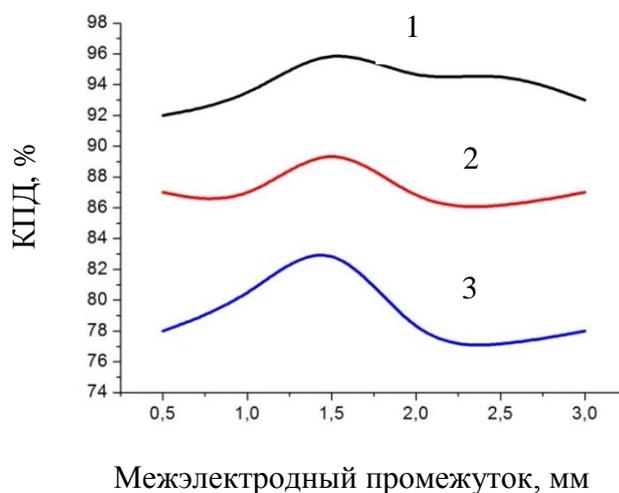


Рисунок 18. Зависимость КПД процесса от межэлектродного промежутка и емкости накопителя: 1 – 2 мкФ; 2 – 10 мкФ; 3 – 30 мкФ.

Из графиков видно, что КПД процесса перекачки энергии не ниже 76%. Это связано с тем, что волновое сопротивление генератора меньше сопротивления искры. В нашем случае волновое сопротивление существенно меньше сопротивления искры (это показано в предыдущем параграфе). Такое соотношение достигается оптимизацией параметров генератора: значительной величиной емкости накопительного конденсатора и малыми значениями индуктивности и омического сопротивления разрядного контура.

Падение напряжения на осциллограммах не достигает нуля, поскольку в разрядном конденсаторе еще остается энергия. Это связано с тем, что в завершающей стадии разряда напряжение на разрядном промежутке уменьшается и его не хватает для поддержания проводимости плазмы искры и прерывается разрядный ток. Напряжение, оставшееся на конденсаторе, зависит от величины межэлектродного промежутка и не зависит от энергии, запасаемой в генераторе. Доля оставшейся энергии по отношению к выделившейся в канале сравнительно низка и лежит в диапазоне от 5% до 20%.

Из графиков зависимости КПД от межэлектродного промежутка можно сделать вывод, что с увеличением емкости (соответственно, энергии накопленной в генераторе) уменьшается и КПД передачи энергии. Изменение межэлектродного промежутка не влечет за собой существенного изменения КПД. Величины изменения лежат в области погрешности измерения и расчета.

3.3 Величина импульсной эрозии электрода-инструмента в зависимости от полярности и энергии генератора

Электрический разряд в газе атмосферного и повышенного давления приводит к эрозии электродов. Причем поскольку при искровом разряде выделяется большое количество тепла и температура внутри искрового канала может достигать 40000°K [46] эрозия электродов неизбежна. Собственно на этом эффекте основано большинство электроискровых технологий. В нашем случае эрозия электрода - инструмента уменьшает ресурс работы установки.

Исследования эрозии электродов при искровой форме разряда хорошо изучены, например Золотых Б.Н. исследовал эрозию электродов применительно к электроискровому легированию [54], Лазаренко Б.Р. исследовал эрозию электродов в процессе размерной обработки и т.д. [74].

Как правило, электрод – инструмент имеет форму острия или стержня с малым радиусом закругления. Из литературных данных видно, что эрозия этого электрода зависит от полярности импульса, величины и формы напряжения, а также от межэлектродного промежутка, рабочей среды, материала электродов. В некоторых случаях наблюдается унос массы материала с одного электрода и прирост массы на другом электроде. Как правило, это характерно для случаев, когда расстояние между электродами невелико. Объясняется это оседанием на аноде распыленного разрядом материала катода.

Для выявления влияния полярности импульса напряжения и энергии генератора на эрозию электрода-инструмента нами были проведены исследования изменения массы электрода. Это является важным, поскольку использовалось в нашем случае два генератора (запускающий и рабочий) и результаты работы ориентированы на обработку – очистку стали от окалины. Такие данные в литературе отсутствовали. Перенос материала с одного электрода на другой исследовался прежде всего и на образцах без окалины. Одним электродом являлся образец вторым электродом электрод-инструмент. Измерения массы электрода-инструмента проводились на электронных весах с точностью 0,1 мг. Скоростная фотография проводилась при помощи видеокамеры Spek со скоростью 10000 кадров в секунду.

На Рисунке 19. Приведены фотографии электродов до и после обработки. Обработка проводилась в аргоне с энергией, выделяющейся в искровом канале 0,4 Дж. Время обработки составляло 5мин. На положительном электроде-инструменте образуются наросты в виде капель серебристого цвета (Рисунок 19Б). Если электрод-инструмент находится под отрицательным

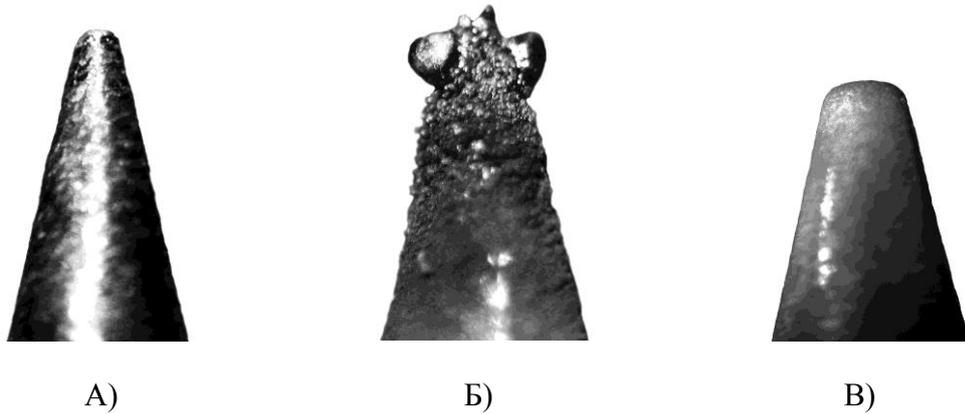


Рисунок 19. Электроды инструменты: А) до обработки; Б) после обработки (энергия выделяемая в искре 0,4 Дж, потенциал электрода положительный); В) после обработки (энергия выделяемая в искре 0,4 Дж, потенциал электрода отрицательный).

потенциалом, наблюдается изменение формы электрода в результате только эрозийных процессов и без других инородных образований.

В ходе эксперимента были построены зависимости, изменения массы электрода-инструмента от энергии импульса и полярности электродов (Рисунок 20).

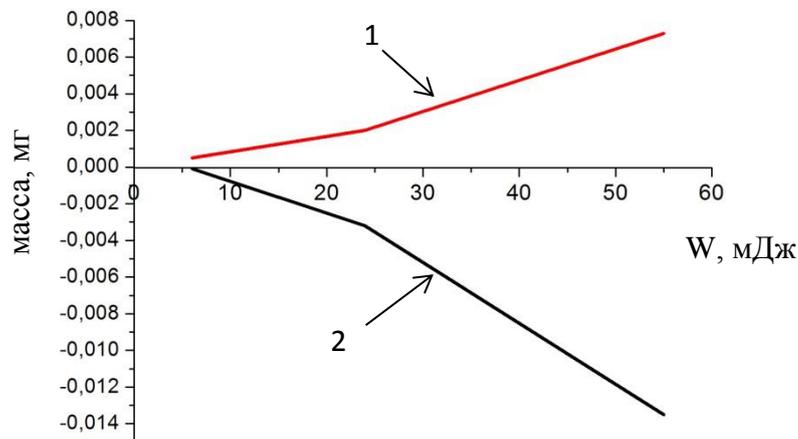


Рисунок 20. Зависимость изменения массы образца от энергии в импульсе и полярности электродов: 1 – электрод-инструмент является катодом; 2 – электрод-инструмент является анодом.

Из зависимостей видно, что в том случае, если электрод-инструмент является катодом, эрозия происходит интенсивно и скорость уноса массы (при данной конфигурации электрода) составляет $\sim 2\text{мг/мин}$. Когда электрод-инструмент является анодом, наблюдается прирост массы электрода за счет образования на его острие капли состоящей из материала образца

(железа). Процесс образования капли на острие электрода-инструмента был зарегистрирован скоростной съемкой, его этапы изображены на Рисунке 21.

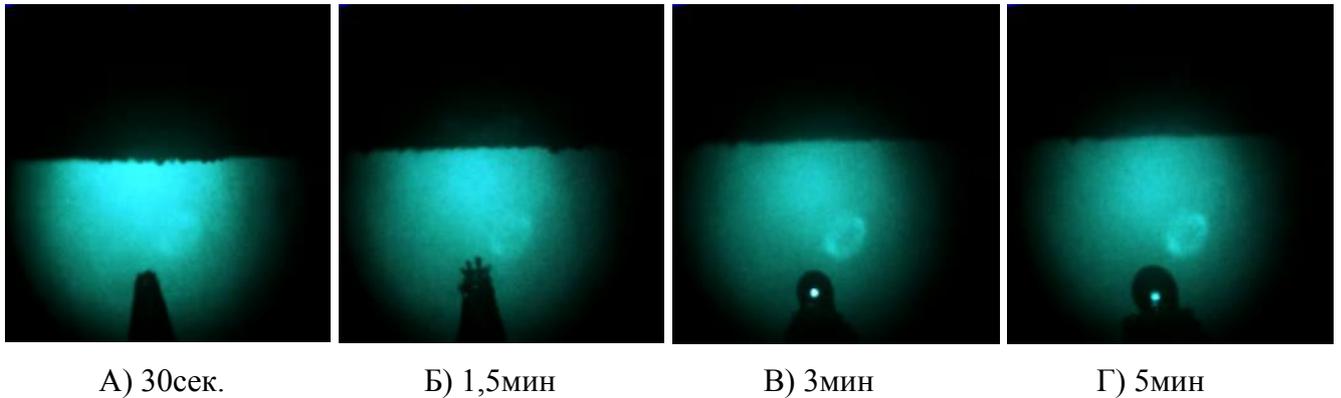


Рисунок 21. Образование капли на острие электрода-инструмента: А) до обработки; Б) появление шариков; В) стягивание шариков в одну большую каплю; Г) увеличение капли с течением времени.

Видно, что первые тридцать секунд острие остается практически неизменным, через полторы минуты на кончике электрода-инструмента образуются шарики, которые спустя 3 минуты стягиваются в одну большую каплю. В дальнейшем эта капля увеличивается в размерах. Затем она может отделиться от электрода-анода или пережечь межэлектродный промежуток. Капля, пережнувшая промежуток, приваривается к подложке и отрывается от него в результате движения электрода-инструмента.

Образование капли происходит в результате осаждения паров подложки (железа) на электроде-инструменте, образованных в межэлектродном промежутке в результате импульсной эрозии. О наличии паров металла в межэлектродном промежутке можно судить по оптическому спектру плазмы (Рисунок 22).

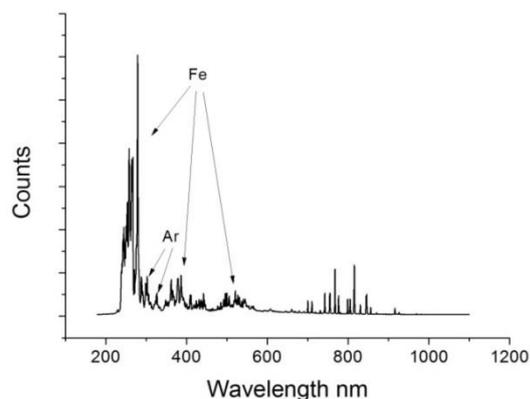


Рисунок 22. Спектр плазмы в межэлектродном промежутке при обработке стали 08КП с энергией в импульсе 54 мДж.

На спектрограмме плазмы наблюдается значительное количество пиков железа. Интенсивность их значительно превосходит интенсивность пиков аргона (аргон являлся рабочей средой). О присутствии вольфрама (материал электрода инструмента) в плазме сложно судить по этим данным, поскольку его пики сливаются с пиками железа.

Выводы по главе:

Импульс тока через межэлектродный промежуток носит аperiodический характер, поскольку сопротивление искрового канала в максимуме тока во всех режимах работы установки больше волнового сопротивления разрядного контура.

В результате проведенных экспериментов можно сделать вывод, что во всех рабочих режимах установки КПД процесса перекачки энергии из накопителя низковольтной емкости не ниже 75%.

Для уменьшения износа электрода-инструмента за счет импульсной эрозии, необходимо чтобы он являлся анодом, а обрабатываемая деталь катодом. Это также исключит внедрение материала электрода в подложку.

ГЛАВА 4 (Модификация поверхности)

В этой главе показано влияние материала электрода, рабочего газа, энергии искрового разряда и потенциал образца на морфологию и фазовый состав поверхности металла. При очистке поверхности металла от оксидной пленки неизбежно происходит воздействие искрового разряда не только на оксидную пленку, но и на поверхность уже очищенную от оксида. Поэтому очень важно знать, как будет меняться морфология и состав поверхности от параметров обработки.

Для изучения влияния искрового разряда на очищенную поверхность металла были использованы образцы из стали 08КП без слоя окалина. Обработка производилась в двух газах аргоне и азоте. Выбор газов был обусловлен тем, что аргон является самым распространенным нейтральным газом и при определенных условиях снижает величину эрозии электрода инструмента, а от азота можно было ожидать участия в плазмохимических реакциях с целью азотирования поверхности. Помимо этого он является восстановительной средой для железа.

Поскольку температура в искровом канале может достигать 30000°C, то и материал электрода-инструмента должен обладать высокой температурой плавления и высокой эрозионной стойкостью согласно литературным данным для этого хорошо подходит вольфрам с температурой плавления 3422°C.

Еще одним параметром, влияющим на модификацию поверхности, является полярность электрода-инструмента относительно образца. Как было показано в предыдущей главе в случае, когда электрод-инструмент находится под отрицательным потенциалом, по отношению к образцу, происходит перенос материала электрода-инструмента на поверхность образца, что может способствовать образованию новых фаз на поверхности металла.

4.1 Обработка поверхности стали при использовании вольфрамового электрода-инструмента с отрицательным потенциалом.

4.1.1 Обработка поверхности электроискровым разрядом при отрицательной полярности электрода-инструмента в атмосфере аргона.

Исследования, по переносу массы материала электрода-инструмента на обрабатываемую поверхность (см. Глава 3.) показали, когда электрод-инструмент находится под отрицательным потенциалом, происходит прирост массы образца, за счет распыления материала электрода-инструмента, при этом на обрабатываемой поверхности наблюдается появления налета (пленки). Этот факт может влиять на свойства и структуру поверхности.

Объектом исследования выступали образцы из листовой стали 08КП размером 10мм x10мм. Образцы подвергались электроискровой обработке (с плотностью 500 разрядов/мм²) в среде аргона с использованием разных энергетических режимов. Энергия задавалась емкостью накопительного конденсатора и составляла 1.1кВт*ч/м², 4.5кВт*ч/м² и 10кВт*ч/м² при емкостях накопительного конденсатора 2 мкФ, 10 мкФ и 30 мкФ соответственно. Напряжение заряда накопительного конденсатора оставалось неизменным и равнялось 170В. Вольфрамовый электрод-инструмент находился под отрицательным потенциалом.

Исследование результатов обработки осуществлялись с помощью растрового электронного микроскопа с приставкой edx для изучения элементного состава и рентгенофазового анализа. Для изучения структуры поверхностного слоя изготавливались поперечные шлифы. После обработки в разных энергетических режимах на поверхности наблюдается образование налета черного цвета. Чем выше энергия в разряде, тем более равномерный слой образуется на поверхности. На Рисунке 23 показаны фотографии поверхности, полученные в разных энергетических режимах. При небольшом увеличении видно, что с ростом энергии выделяемой в разряде меняется картина на поверхности образцов. На поверхности образца обработанного с энергией 1.1кВт*ч/м² хорошо видны следы шлифовки и прослеживаются участки металла не покрытые образовавшимся слоем налета. На поверхности образца полученного при обработке с энергией 4.5кВт*ч/м² также наблюдаются следы шлифовки, но отсутствуют места баз налета. Образец равномерно покрыт пятнами, при рассмотрении их с большим увеличением складывается ощущение, что налет, образованный в результате обработки состоит из нескольких слоев, а пятна образовались в результате отслаивания участков верхнего слоя (Рисунок 24), причем структура нижнего слоя совпадает со структурой слоя на образце полученного при обработке с энергией 1.1кВт*ч/м². Поверхность образца обработанного с энергией 10кВт*ч/м² покрыта равномерным слоем налета и в отличии от предыдущих образцов

следы шлифовки практически не просматриваются, этот факт свидетельствует о увеличении толщины налета.

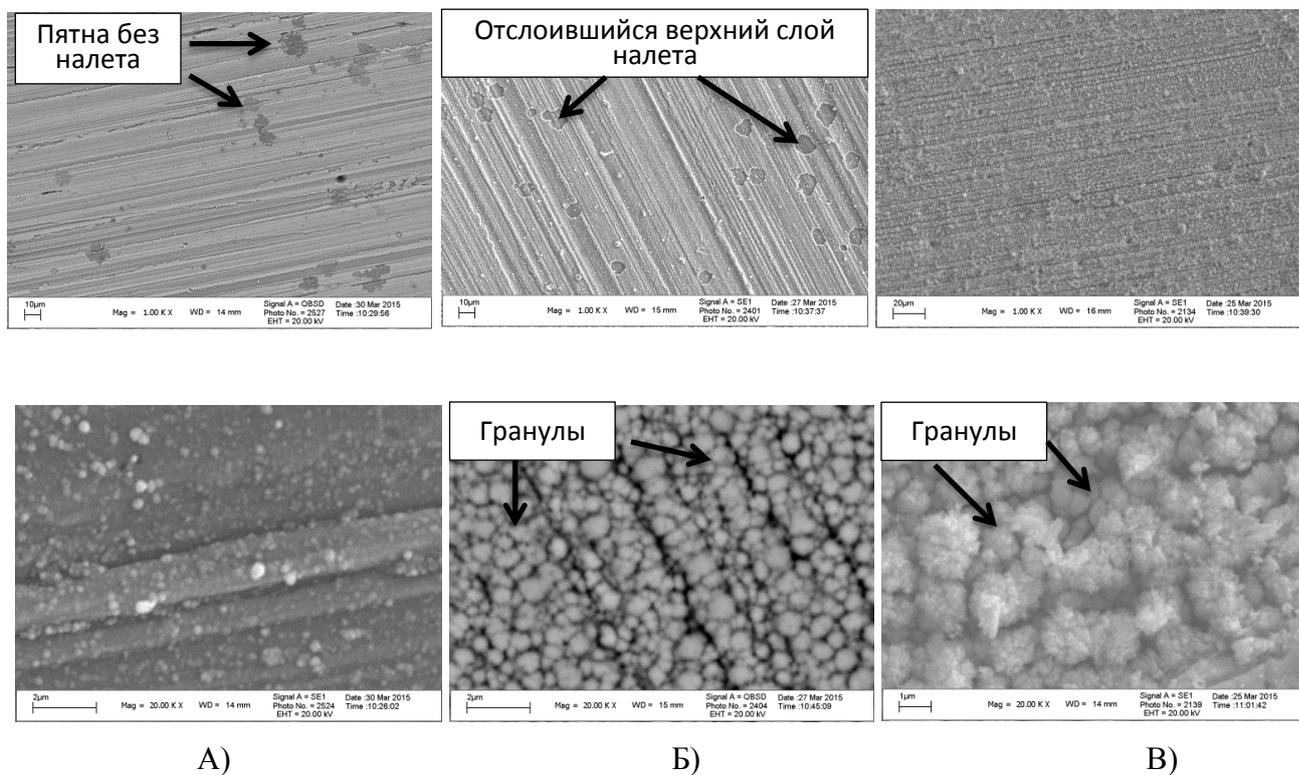


Рисунок 23. Поверхность металла, обработанная в аргоне; вольфрамовый электрод-инструмент, потенциал электрода отрицательный: А) энергия в искровом разряде $1,1\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; Б) энергия в искровом разряде $4,5\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, В) энергия в искровом разряде $10\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$.

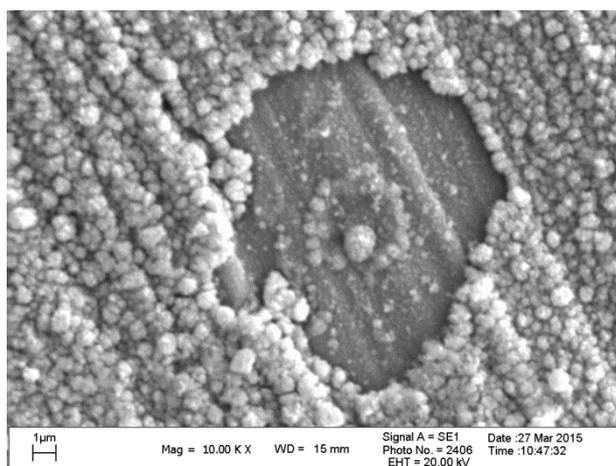


Рисунок 24. Одно из пятен на поверхности образца полученного при обработке в аргоне, с энергией в искровом разряде $4,5\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ (потенциал электрода-инструмента отрицательный)

При рассмотрении поверхностей образцов с увеличением ($\times 20\ 000$) видно, что налёт выглядит в виде гранул, плотно прижатых друг к другу, и чем больше энергия, выделяющаяся в искровом разряде, тем больший диаметр имеют гранулы (Рисунок 1). Но из фотографии (Рисунок 25), сделанной вместе нарушенной целостности образовавшегося слоя видно, что слой имеет не гранулированную, а дендритную структуру. Отсюда можно сделать вывод, что при обработке с низкими энергиями мы видим начальный этап зарождения дендритов (их основание), а при больших энергиях уже вершину. С ростом дендрита увеличивается объем его верхней части по сравнению с основанием. Это мы и наблюдаем, при обработке с разной энергией, выделяющейся в искровом разряде.

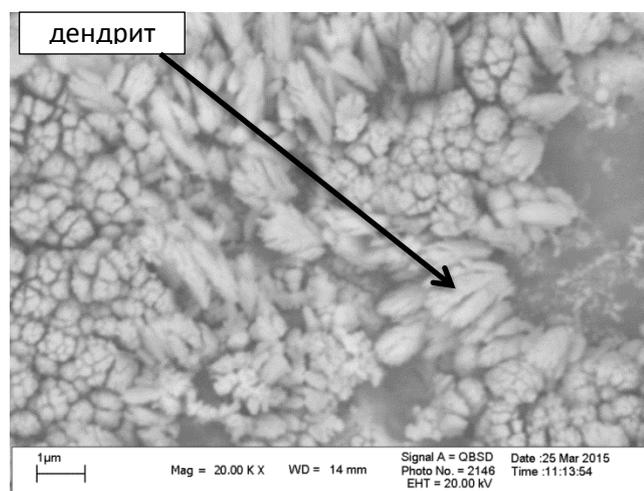


Рисунок 25. Дендриты, образованные на поверхности образца обработанного в аргоне с энергией в искровом разряде $10 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2$ (потенциал электрода-инструмента отрицательный).

Образовавшийся налет имеет довольно рыхлую структуру и при обработке образцов в ультразвуковой ванне часть налета удаляется. Причем поверхность образцов обработанных с удельной энергией $1,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2$ после ультразвуковой ванны остается неизменной. Это говорит о том, что основания дендритов довольно сильно связано с поверхностью образца, сама структура дендрита является не плотной и легко отделяется от основания.

Поперечное сечение образца обработанного с энергией $10 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2$ изображено на Рисунке 26.

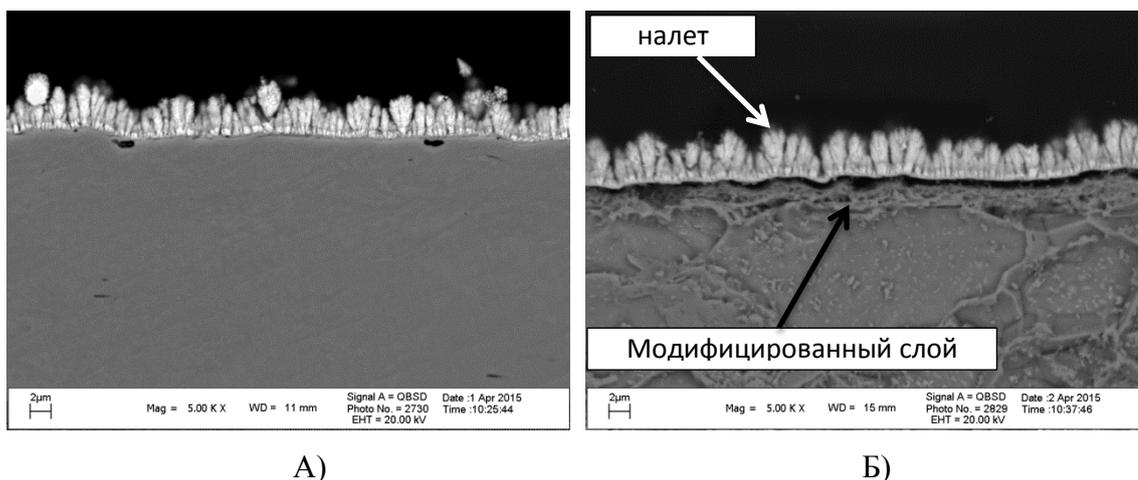


Рисунок 26. Поперечное сечение образца обработанного в аргоне с энергией в искровом разряде $10 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ (потенциал электрода-инструмента отрицательный): А) без травления; Б) с травлением.

На фотографиях видно, что налет действительно имеет дендритную структуру. Причем основание дендритов имеют диаметр меньший, чем их верхняя часть и отличаются по цвету, что может свидетельствовать о более плотной структуре. На фото Рисунок 26А видно, что основание дендритов плотно прилегает к материалу образца, в то время как верхняя часть дендритов имеет рыхлую структуру и непрочна связана с основанием. На образце, подвергнутом химическому травлению 5% раствором HNO_3 (Рисунок 26Б) под дендритами наблюдается слой металла с измененной структурой толщиной $\sim 2 \text{ мкм}$. Измененный слой имеет размер зерна много меньший, чем исходный образец. Вероятно, образование слоя с более мелкой структурой происходит в зоне термического воздействия искрового канала.

Элементный состав показывает большое наличие вольфрама W и железа Fe на поверхности образца. Причем элементный же состав, но сделанный по линии вглубь образца (Рисунок 27) показывает, что практически весь вольфрам находится в налете образовавшемся в процессе обработки.

Согласно рентгенограммам, на поверхности находится вольфрам в чистом виде, а так же образуется новая фаза интерметаллида Fe_7W_6 . Согласно [105] это соединение образуется из расплава железа с 20% атомарного вольфрама при температуре 1637 C° . Соединение стабильно в широком диапазоне температур вплоть до комнатной.

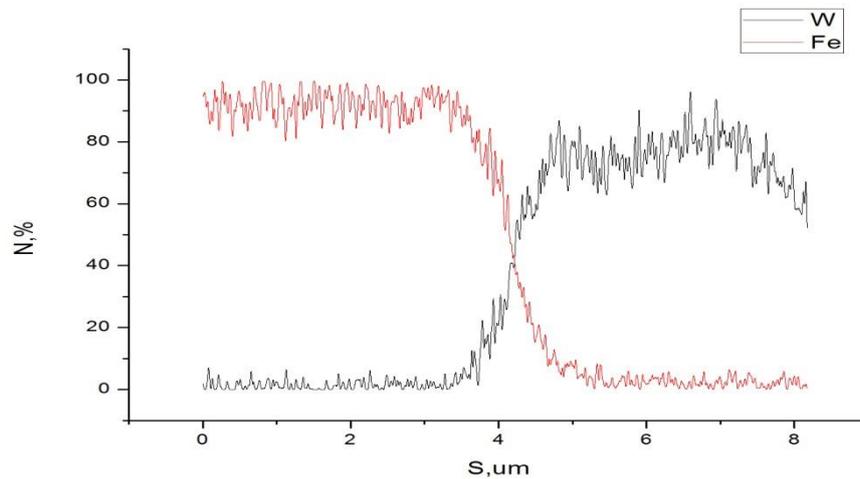
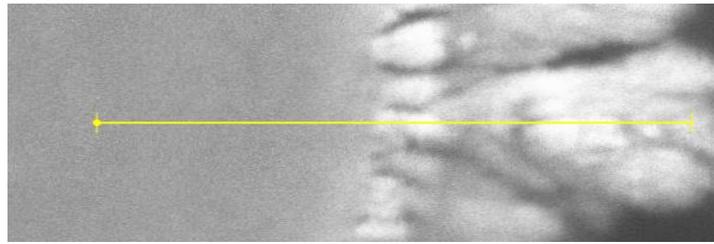


Рисунок 27. Распределение вольфрама и железа по линии в глубину образца обработанного в аргоне с энергией в искровом разряде $10 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ (потенциал электрода-инструмента отрицательный)

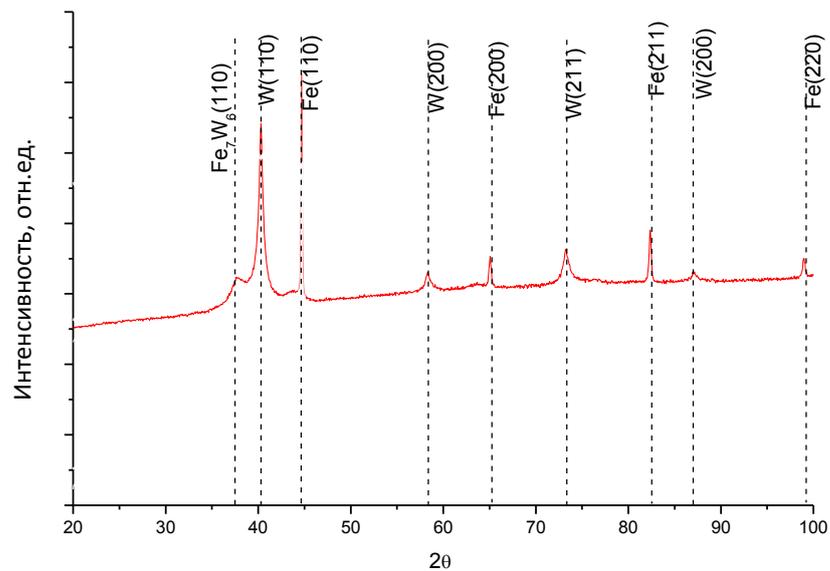


Рисунок 28. Рентгенограмма образца обработанного в аргоне с энергией в искровом разряде $10 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ (потенциал электрода-инструмента отрицательный)

Из соотношения площадей под пиками можно сделать вывод, что содержание интерметалида значительно меньше содержания чистого вольфрама. Поскольку интерметалид согласно [106] образуется из расплава логично предположить, что он содержится в тонком поверхностном слое с измененной структурой сразу под образовавшимся налетом.

Резюмируя все выше изложенное, процессы протекающие на поверхности образца выглядят следующим образом:

- в результате действия высокой температуры и взрывной эмиссии с поверхности электрода инструмента идет интенсивное распыление вольфрама;
- под действием высокой температуры в катодном пятне происходит расплавление тонкого слоя железа с одновременным его испарением;
- вольфрам, распыленный с электрода-инструмента частично переходит в расплав с образованием интерметалида Fe_7W_6 , а остальной вольфрам оседает на поверхности в чистом виде.

Причина неполного перехода вольфрама в раствор железа, связана:

- С высокой скоростью охлаждения. Если скорость осаждения меньше скорости охлаждения температура в зоне расплава ниже, чем необходима для образования интерметалида Fe_7W_6 ;
- С небольшой зоной расплава. Так как распыленный вольфрам под действием газодинамических сил разлетается не только под электрод, но и в стороны, а зона расплава занимает ограниченную площадь меньшую, чем диаметр облака разлет, то только некоторая часть распыленного вольфрама попадает на расплавленный участок.

4.1.2 Обработка поверхности электроискровым разрядом при отрицательной полярности электрода-инструмента в атмосфере азота.

Использование азота в качестве рабочей атмосферы, при электроискровой обработке обусловлено возможностью азотирования поверхности. Процесс азотирования поверхности применяется с целью увеличения твердости поверхностного слоя тем самым придания стали необходимых свойств.

Объектом исследования выступали образцы из листовой стали 08КП размером 10мм x10мм. Образцы подвергались электроискровой обработке (с плотностью 500 разрядов/мм²) в среде азота с использованием трех энергетических режимов. Энергия задавалась емкостью накопительного конденсатора и составляла 1.1кВт*ч/м², 4.5кВт*ч/м² и 10кВт*ч/м². Напряжение заряда накопительного конденсатора оставалось неизменным и равнялось 170В. Электрод-инструмент из вольфрама находился под отрицательным потенциалом.

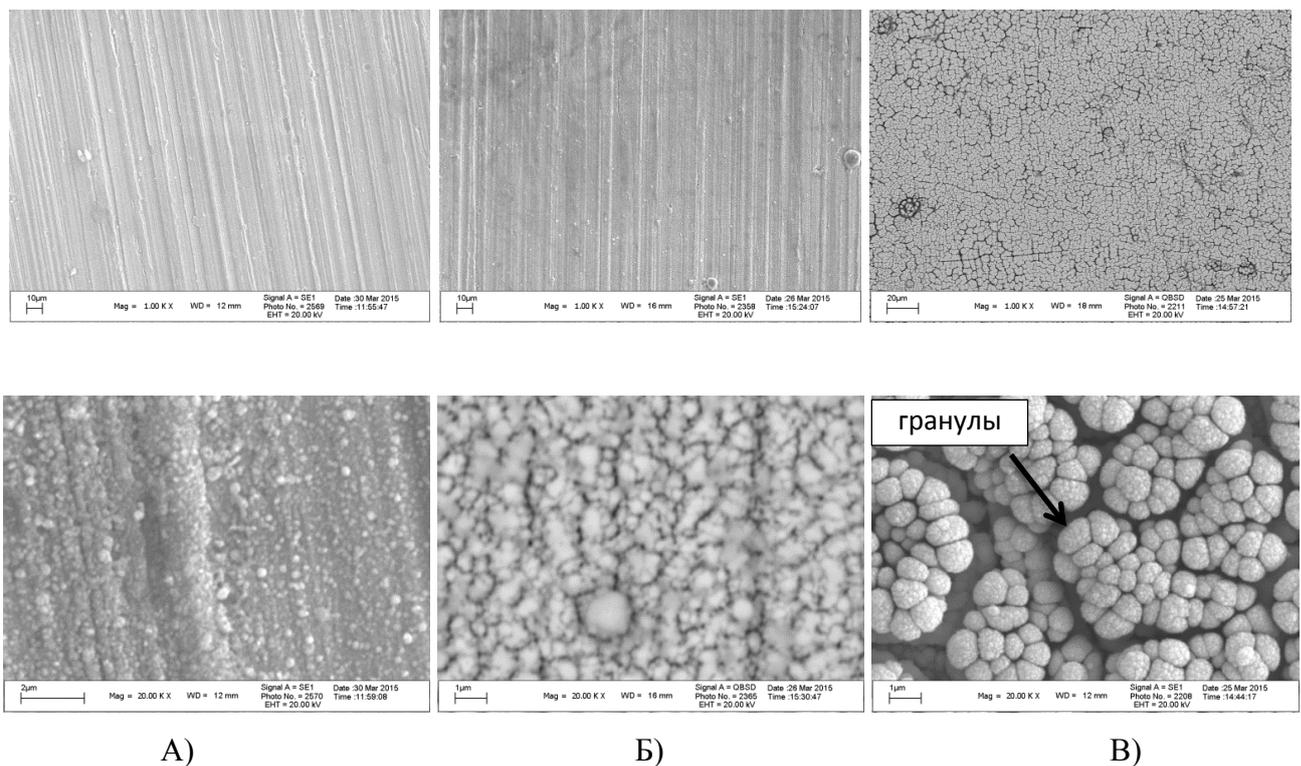


Рисунок 29. Поверхность металла, подвергнутая обработке в азоте, вольфрамовым электродом-инструментом, потенциал электрода-инструмента отрицательный: А) энергия в искровом разряде 1,1кВт*ч/м²; Б) энергия в искровом разряде 4,5кВт*ч/м², В) энергия в искровом разряде 10кВт*ч/м².

На Рисунке 29 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. На поверхности образца обработанного с энергией $1.1 \text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ также видны следы шлифовки, но в отличие от образцов получаемых в аргоне отсутствуют участки металла не покрытые образовавшимся слоем налета. Поверхность образца полученного при обработке с энергией $4.5 \text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в среде азота, как и при обработке в аргоне следы шлифовки менее отчетливы, однако налет образовавшийся на поверхности очень однородный и не имеет ни каких дефектов в виде пятен. Самое большое отличие в структуре образовавшегося налета наблюдается на образцах обработанных с энергией $10 \text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$. В обоих случаях поверхность покрыта равномерно, 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 29В).

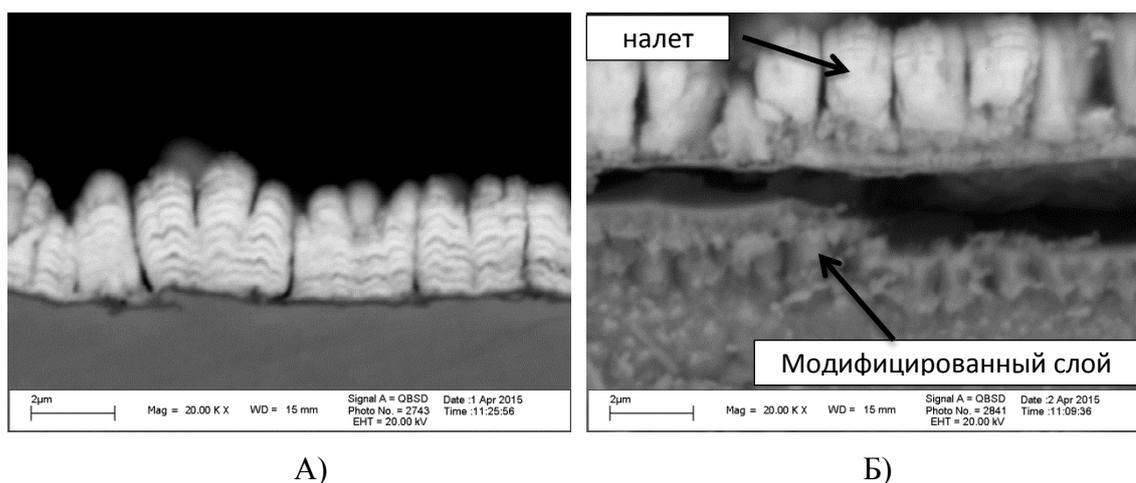


Рисунок 30. Поперечное сечение образца обработанного в азоте с энергией в искровом разряде $10 \text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ (потенциал электрода-инструмента отрицательный): А) без травления; Б) с травлением.

На фотографии поперечного сечения образца (Рисунок 30А) хорошо видно, что в налет имеет слоеную структуру, однороден по всему объему и разбит на отдельные участки. У основания между налетом и материалом образца просматривается четкая щель, образовывавшаяся во время шлифовки и увеличившаяся при химическом травлении 5% раствором HNO_3 которая, говорит о слабой адгезии между образовавшимся налетом поверхностью образца. Под слоем налета, как и на образце, обработанном в среде аргона, присутствует слой металла с изменённой структурой, но толщина этого слоя меньше в два раза и составляет $\sim 1 \text{мкм}$.

Элементный состав, собранный с поверхности образца (Таблице 5) показывает, что налет в основной массе состоит из вольфрама, присутствие азота обусловлено атмосферой, в которой велась обработка, а наличие кислорода можно объяснить присутствием в газовой среде паров воды.

Таблица 5. Элементный состав поверхности образца.

	Вес. %	Атом. %
N	2,66	9,29
O	13	39,7
Fe	3,17	2,77
W	74,15	19,7

Как и на образцах, обработанных в атмосфере аргона весь вольфрам находится в слое налета образовавшегося в процессе обработки (Рисунок 9).

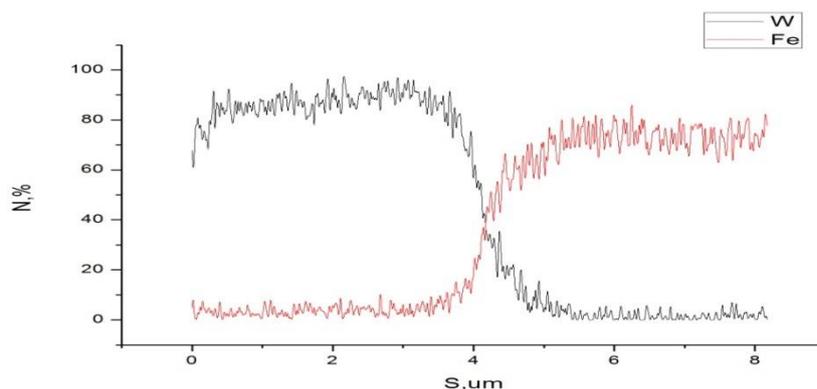
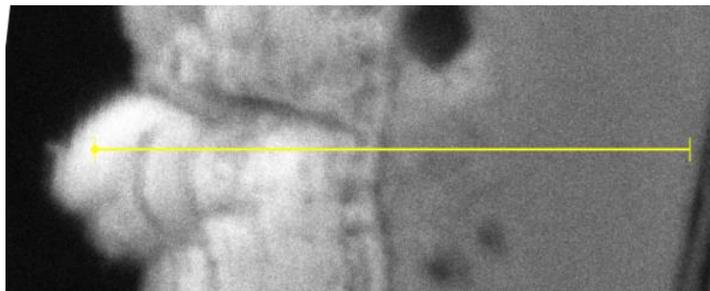


Рисунок 31. Распределение вольфрама и железа по линии в глубь образца обработанного в азоте с энергией в искровом разряде $10 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ (потенциал электрода-инструмента отрицательный).

Рентгенограммы, представленные на Рисунке 32, показывают, что на поверхности находится нитрид вольфрама W_2N и отсутствует чистый вольфрам как на образцах,

обработанных в среде аргона при тех же параметрах. Помимо нитрида вольфрама, на поверхности так же образуется оксид железа Fe_2O_3 в результате взаимодействия кислорода из паров воды и сублимированного железа с поверхности образца.

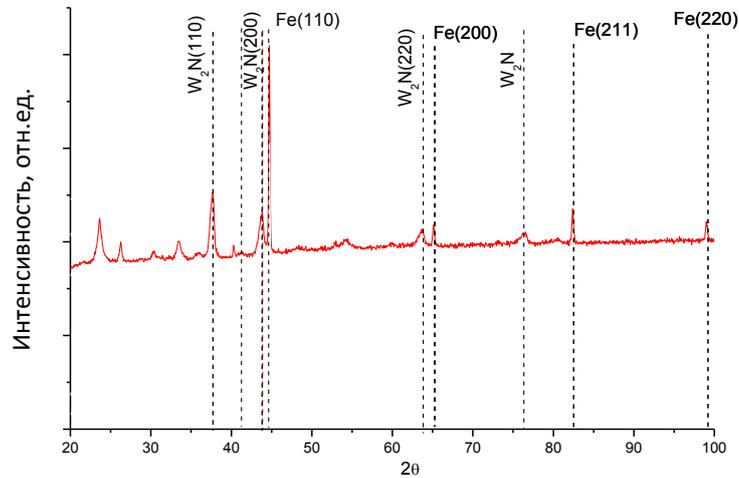


Рисунок 32. Рентгенограмма образца обработанного в азоте с энергией в искровом разряде $10\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ (потенциал электрода-инструмента отрицательный)

В результате получается, что при обработке стали 08КП в атмосфере азота на поверхности образуется налет толщиной 2мкм, состоящий из нитрида вольфрама и оксида железа. Налет плохо связан с поверхностью образца и имеет слоистую структуру. Под налетом наблюдается модифицированный слой толщиной $\sim 1\text{мкм}$ и с зерном размером $\sim 1\text{мкм}$.

4.2 Обработка поверхности стали при использовании вольфрамового электрода-инструмента с положительным потенциалом.

Исследования описанные в разделе 4.2 показали, что обработка поверхности металла электродом-инструментом под отрицательным потенциалом приводит к образованию на поверхности обрабатываемого образца налета состоящего преимущественно из материала электрода-инструмента. Этот факт не позволит добиться сто процентного очищения поверхности и тем самым не может быть использован при электроискровой очистке металлических поверхностей. Помимо этого электрод инструмент быстро эродирует, тем самым необходимо будет делать систему контроля межэлектродного промежутка, что приведет к усложнению и удорожанию всей установки в целом.

Объектом исследования выступали образцы из листовой стали 08КП размером 10мм x10мм. Образцы подвергались электроискровой обработке (с плотностью 500 разрядов/мм²) в среде аргона и азота с использованием разных энергетических режимов. Энергия задавалась емкостью накопительного конденсатора и составляла 1.1кВт*ч/м², 4.5кВт*ч/м² и 10кВт*ч/м² при емкостях накопительного конденсатора 2 мкФ, 10 мкФ и 30 мкФ соответственно. Напряжение заряда накопительного конденсатора оставалось неизменным и равнялось 170В. Электрод-инструмент находился под положительным потенциалом и выполнялся из вольфрама.

Исследование результатов обработки осуществлялись с помощью растрового электронного микроскопа с приставкой edx для изучения элементного состава, и рентгенофазового анализа. Для изучения структуры поверхностного слоя изготавливались поперечные шлифы.

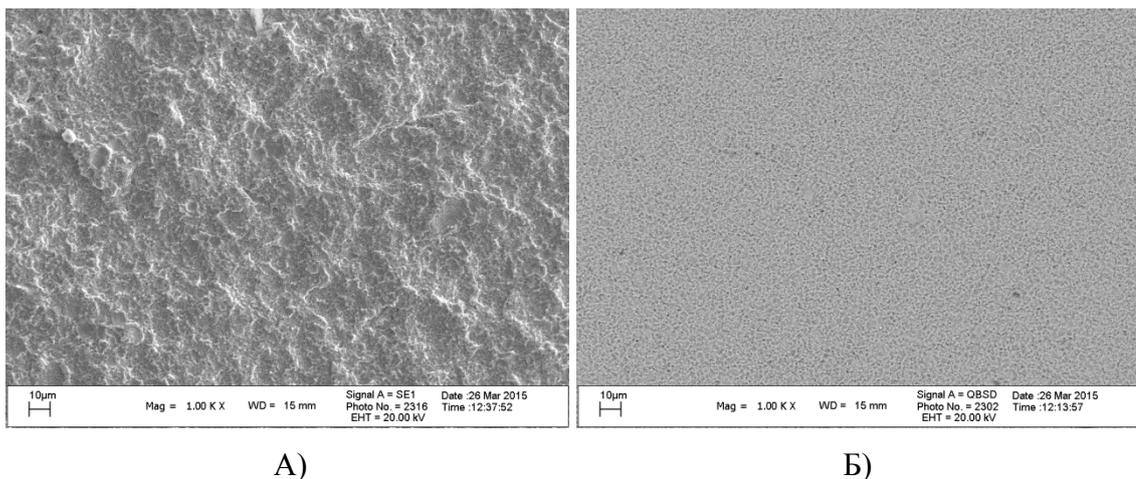


Рисунок 33. Поверхность металла, подвергнутая обработке вольфрамовым электродом-инструментом, энергия в искровом разряде 10кВт*ч/м², потенциал поверхности отрицательный: А) аргон; Б) азот.

На поверхности, обработанной при положительной полярности электрода-инструмента в отличие от поверхности, обрабатываемой с отрицательной полярностью электрода инструмента, не образуется ни какого налета. Сталь после обработки имеет матовую поверхность серебристого цвета. На Рисунке 33 изображены фотографии поверхностей образцов обработанных в азоте и аргоне при прочих равных условиях. При малых увеличениях ($\times 1000$) поверхность, полученная в аргоне, является бугристой, в то время как поверхность, полученная в азоте, представляется более однородной.

Однако следует отметить, что при обработке в азоте пористость поверхности значительно выше, нежели при обработке в аргоне. Это хорошо видно при изучении поверхности в растровый электронный микроскоп в отраженных электронах (Рисунок 34). Этот эффект связан с тем, что азот обладает свойством проникать в металл и растворяться в нем когда он расплавлен [1], в то время как аргон является абсолютно инертным. В аргоне же поры представляют собой пустоты,

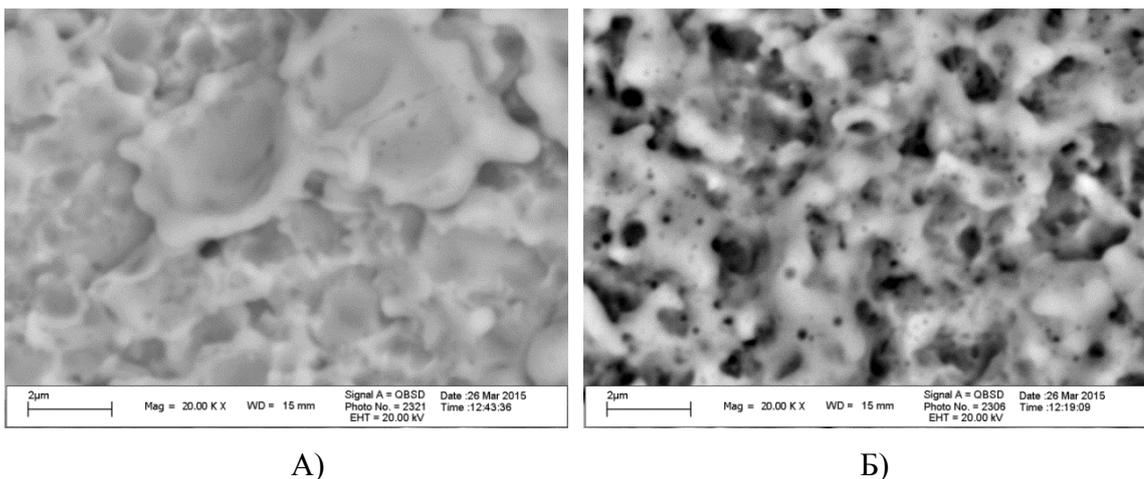
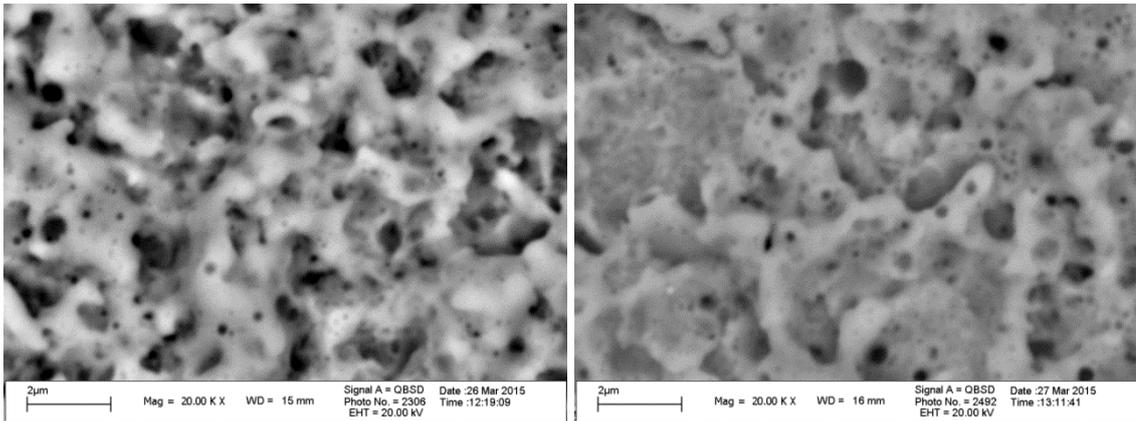


Рисунок 34. Поверхность металла, подвергнутая обработке вольфрамовым электродом-инструментом, энергия в искровом разряде $10\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, потенциал поверхности отрицательный: А) аргон; Б) азот.

образовывающиеся в местах, где расплавленный металл, выплеснутый из кратера, не успевает растечься по поверхности из-за высокой степени охлаждения. В то же время количество пор на поверхности зависит от энергии, выделявшейся в искровом промежутке, и чем ее больше, тем более пористая поверхность (Рисунок 35), при чем это наблюдается на всех образцах вне зависимости от газовой среды, в которой производилась обработка.



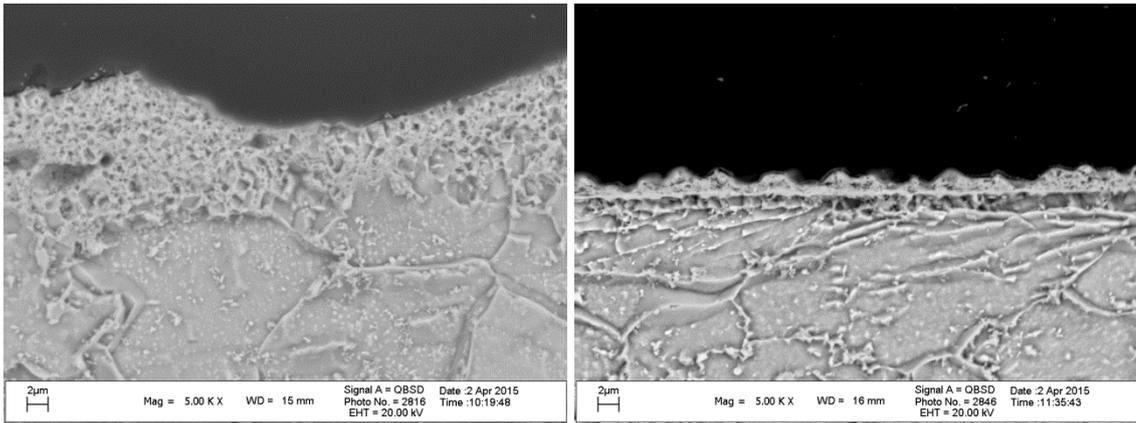
А)

Б)

Рисунок 35. Поверхность металла, подвергнутая обработке в азоте, вольфрамовым электродом-инструментом, потенциал поверхности отрицательный: А) энергия в искровом разряде $10 \text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$; Б) энергия в искровом разряде $4,5 \text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$.

На поперечных сечениях образцов стали (Рисунок 36), обработанных в аргоне и азоте, отчетливо видно присутствие на поверхности слоев с модифицированной структурой. Образец, обработанный в аргоне, имеет модифицированный слой $\sim 4 \text{ мкм}$ с мелкозернистой структурой, с размером зерна $\sim 0,5 \text{ мкм}$, сразу переходящей в исходную структуру стали. Образец же образованный в азоте на самой поверхности имеет пористый слой толщиной $\sim (1 \div 2) \text{ мкм}$, структура этого слоя не проявляется при химическом травлении 5% раствором азотной кислоты (HNO_3). Можно предположить, что его структура настолько мелкая, что не видна при увеличении до $\times 20000$, либо этот слой является аморфным и не имеет кристаллической структуры, что то же возможно благодаря высокой степени охлаждения. Так же на образце, обработанном в азоте, наблюдается переходной слой толщиной $\sim 2 \text{ мкм}$ с мелким зерном размером $\sim 2 \text{ мкм}$, этот слой находится между слоем верхним поверхностным слоем и основной структурой образца.

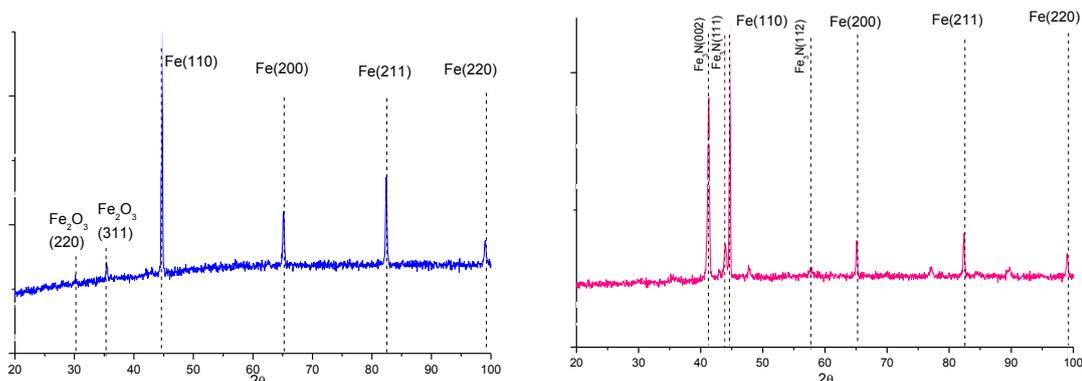
Фазовый состав образцов, полученных в аргоне, не отличается от фазового состава исходных образцов, а при больших энергиях, выделяемых в искровом канале, на рентгенограмме (Рисунок 37А) появляются пики оксида железа. Это связано с наличием в аргоне паров воды.



А)

Б)

Рисунок 36 Поперечное сечение образцов обработанных с энергией в искровом разряде $10\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ (потенциал электрода-инструмента положительный): А) аргон; Б) азот.

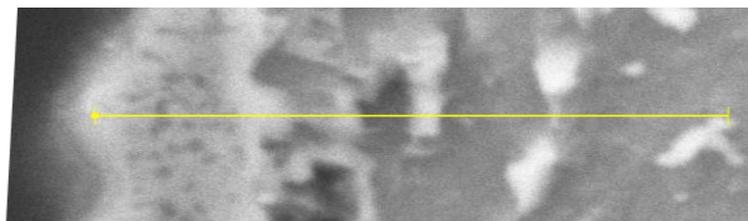


А)

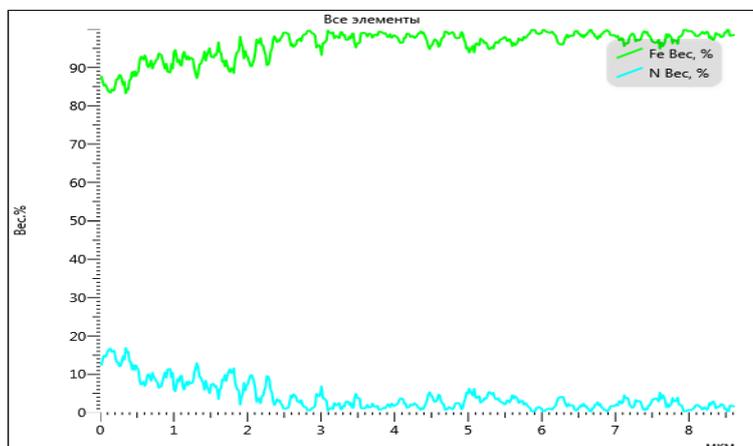
Б)

Рисунок 37. Рентгенограммы образцов обработанных с энергией в искровом разряде $10\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ (потенциал электрода-инструмента положительный): А) аргон; Б) азот.

На рентгенограммах, снятых с поверхности образца полученного при обработке в азоте (Рисунок 37Б), появляются пики нитрида железа (Fe_3N). Причем, чем выше энергия выделяемых в искровом канале, тем выше интенсивность пиков нитрида. Распределение элементного состава по линии в глубь образца (Рисунок 38) показало, что весь азот находится в области первого модифицированного слоя имеющего высокую пористость и неопределённую кристаллическую структуру. Не исключено, что часть азота определяемого микроанализом находится в порах. Так же не исключено, что при подготовке шлифов часть нитридов распалась в результате локального перегрева в результате абразивной обработки.



А)



Б)

Рисунок 38. Распределение азота и железа по линии в глубь образца обработанного в азоте с энергией в искровом разряде $10 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ (потенциал электрода-инструмента положительный).

В результате электроискровой обработке поверхности стали в газе атмосферного давления, с использованием вольфрамового электрода инструмента и межэлектродным промежутком 1,5 мм, можно отметить следующие факты:

- Поверхность стали, полученная в атмосфере аргона, имеет волнистый рельеф с образованием модифицированного поверхностного слоя, толщиной $\sim 4 \text{ мкм}$, имеющего кристаллическую структуру с размером зерна $\sim 0,5 \text{ мкм}$, с фазовым составом не отличающимся от исходного;

- Поверхность стали, полученная в атмосфере аргона, имеет однородный развитый рельеф с образованием двух модифицированных поверхностных слоев, толщиной по $\sim 2 \text{ мкм}$. Верхним модифицированный слой пористый и стоек к химическому травлению в 5% растворе азотной кислоты. Второй слой имеет кристаллическую структуру с размером зерна $\sim 2 \text{ мкм}$. Фазовый состав поверхности стали отличается от исходного наличием пиков нитрида железа Fe_3N ;

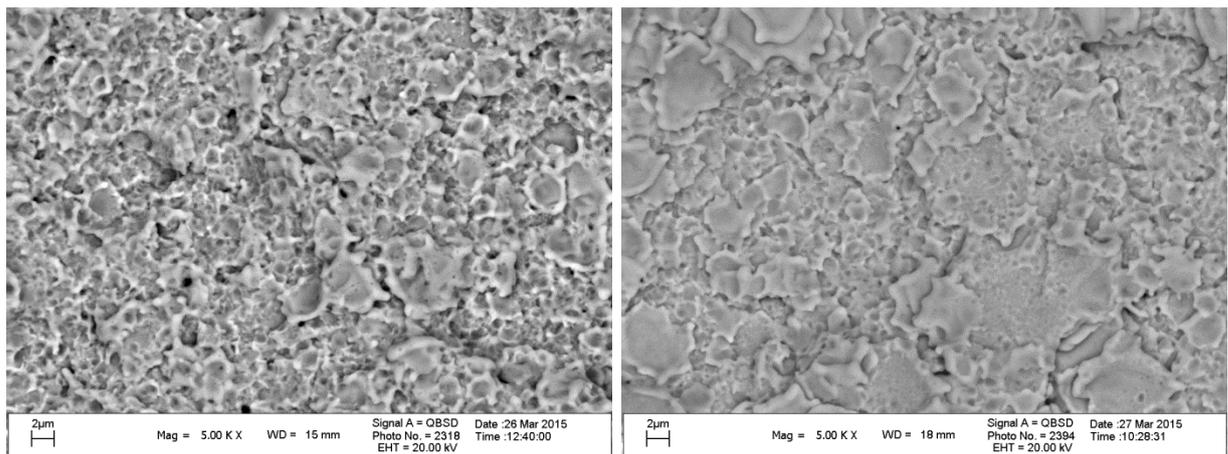
- Поверхность стали, полученная в результате обработки в среде аргона менее пористая, по сравнению с поверхностью стали получаемой при обработке в среде азота.

4.3 Влияние мощности выделяемой в искровом промежутке на рельеф поверхности.

Интересным фактом на который стоит обратить внимание – как влияет мощность выделяемая в искровом промежутке на формирование ее рельефа.

Объектом исследования выступали образцы из листовой стали 08КП размером 10мм x10мм. Образцы подвергались электроискровой обработке (с плотностью 500 разрядов/мм²) в среде аргона и азота с использованием разных энергетических режимов. Энергия задавалась емкостью накопительного конденсатора и составляла 1.1кВт*ч/м², 4.5кВт*ч/м² и 10кВт*ч/м² при емкостях накопительного конденсатора 2 мкФ, 10 мкФ и 30 мкФ соответственно. Напряжение заряда накопительного конденсатора оставалось неизменным и равнялось 170В. Электрод-инструмент находился под положительным потенциалом и выполнялся из вольфрама.

Образцы, обработанные в аргоне при положительном потенциале подложки, но с разными удельными затратами энергии на площадь поверхности имеют практически одинаковый рельеф (Рисунок 39).



А)

Б)

Рисунок 39. Поверхность металла обработанная в аргоне при отрицательной поверхности образца с электродом инструментом из вольфрама: А) энергия – 4,5кВт*ч/м², максимальная мощность - 5010Вт; А) энергия – 10кВт*ч/м², максимальная мощность – (5,5-6) кВт.

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

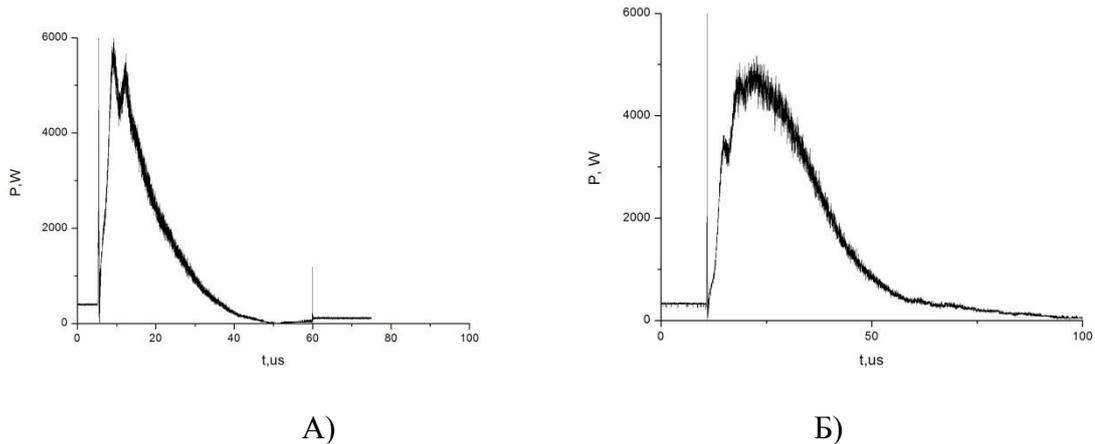


Рисунок 40. Диаграммы мощности искрового разряда, полученные при обработке стали в аргоне при атмосферном давлении: А) энергия – $4,5\text{кВ}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, максимальная мощность – 6000 Вт; А) энергия – $10\text{кВ}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, максимальная мощность – 5500 Вт.

от напряжения накопительной емкости и индуктивности разрядного контура [46], а они оставались неизменными. При изменении же емкости накопительного конденсатора меняется длительность воздействия искры на поверхность. То же самое наблюдается при обработке образцов азоте (Рисунок 41), рельеф поверхности практически не изменяется в зависимости от энергии, выделенной в искровом промежутке.

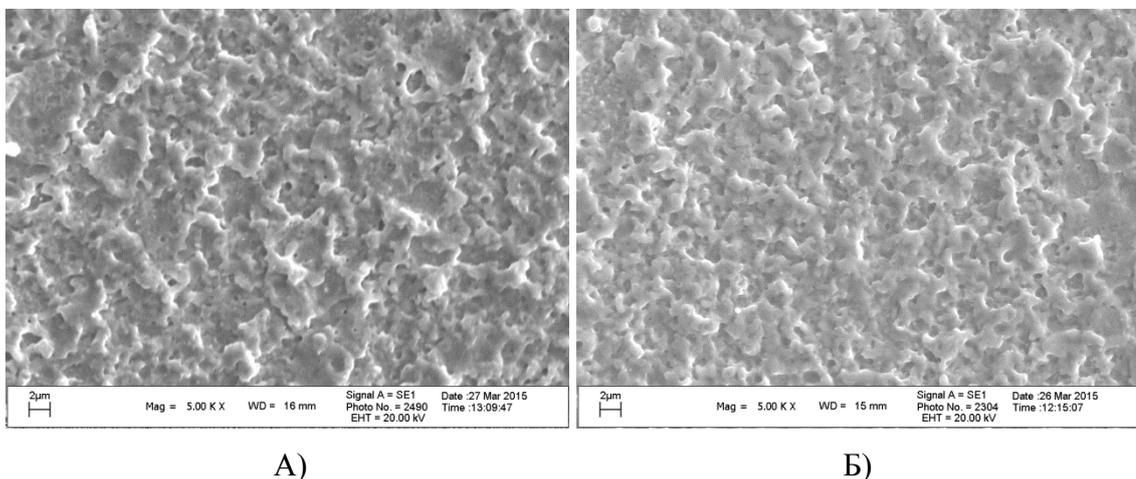


Рисунок 41. Поверхность металла обработанная в аргоне при отрицательной поверхности образца с электродом инструментом из вольфрама: А) энергия – $4,5\text{кВ}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, максимальная мощность - 5010Вт; А) энергия – $10\text{кВ}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, максимальная мощность - 4980Вт.

Выводы по главе:

1. В процессе обработки металлической поверхности, при отрицательном потенциале электрода-инструмента, на поверхности образуется налет на (80-90)% состоящий из материала электрода-инструмента (в данном случае вольфрама).
2. В слоях, полученных в процессе обработки металлической поверхности, при отрицательном потенциале электрода-инструмента, образуются новые фазы: в слое, полученном в аргоне это интерметаллид Fe_7W_6 , а в слое, полученном в азоте это нитрид Fe_3N .
3. Под образовавшимся слоем на поверхности металла после обработки с отрицательным потенциалом электрода-инструмента образуется модифицированный слой и 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 ~ 1 мкм и такой же размер зерна.
4. Поверхность стали обработанной положительной полярности электрода-инструмента имеет матовую поверхность серебристого цвета. Причем поверхность, полученная при обработке в азоте является более однородной и пористой нежели поверхность полученная в аргоне.
5. 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 $\sim 0,5$ мкм, с фазовым составом не отличающимся от исходного;
6. Поверхность стали, полученная в результате обработки с положительным потенциалом электрода-инструмента 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_3N ;
7. На формирование рельефа поверхности влияет главным образом максимальная пиковая мощность разряда.

Глава 5 (Очистка поверхности образцов стального проката)

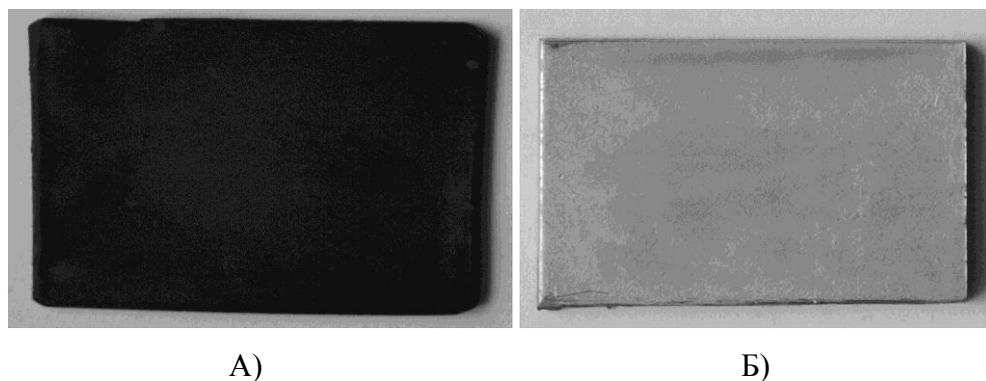
Самым распространённым материалом для изготовления металлических конструкций в промышленности являются стальной прокат, который перед использованием нуждается в предварительной очистке. В результате хранения и производства на металле образуются оксидные пленки различной толщины. Для определения влияния толщины пленки на процесс очистки в этой главе рассмотрены исследования, проводимые на модельных образцах со слоем окалины толщиной до 1 мкм и 10 мкм.

5.1 обработка поверхности стали с оксидной пленкой толщиной до 1 мкм

Толщина пленки до 1 мкм является диэлектрическим покрытием, не должно влиять на процесс обработки и результаты, полученные при обработке таких образцов должны совпадать с результатами обработки стали вообще без окалины. Однако из литературы известно, что чем тоньше диэлектрическая пленка, тем выше ее диэлектрическая прочность на единицу толщины.

Эксперименты для удаления тонких оксидных пленок проводились на образцах из холоднокатаной стали 08КП. Для нанесения слоя окалины образцы отжигались, в муфельной печи при температуре 310°C. Толщина слоя определялась по цвету побежалости и составляла ~ 0.1 мкм (синий цвет). Обработка производилась в азоте. Межэлектродный промежуток составлял 1,5 мм. Для выяснения влияния энергии выделяющейся в межэлектродном промежутке обработка производилась в двух режимах с энергией в импульсе 0,03 Дж и 0,4 Дж.

В обоих случаях во время обработки слой окалины полностью был удален с поверхности образца. На Рисунке 42. изображены фотографии образцов обработанного и не обработанного.



Рисунке 42 Фото образцов: А) не обработанный; Б) обработанный.

Для того чтобы посмотреть модификацию поверхностного слоя были сделаны поперечные шлифы образцов (Рисунок 43).

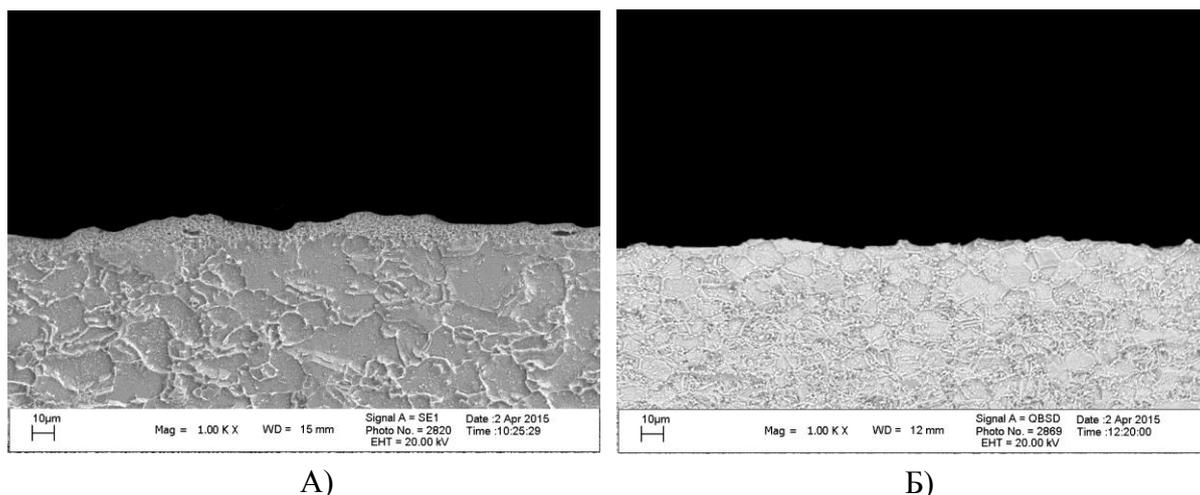


Рисунок 43. Поперечные сечения образцов: А) образец обработанный с энергией 0,4Дж; Б) образец обработанный с энергией 0,03Дж.

Из фотографий поперечных сечений видно, что на образце обработанном с энергией импульса 0,4Дж появляется модифицированный слой толщиной ~ 10 мкм. На втором образце, который обрабатывался с энергией 0,03 Дж в импульсе, модифицированный слой отсутствует. Это говорит о том, что во втором случае энергии импульса хватило только на то чтобы удалить слой окалины.

Вероятнее всего, механизм удаления окалины заключается в субсидировании слоя окалины с поверхности образца. Поскольку температура диссоциации окалины (FeO) составляет $\sim 1500^\circ\text{C}$, а температура в канале искры может достигать $10000 \div 30000^\circ\text{C}$. Так же это предположение подтверждает тот факт, что при воздействии одиночного искрового разряда с энергией 0,03 Дж остается очищенный след диаметром 400 мкм^2 с учетом полшины оксидной пленки в $0,1 \text{ мкм}$ с поверхности удаляется оксид объемом $0,00125 \text{ мм}^3$. Исходя из плотности оксида железа (FeO) равной $5,75 \text{ г/см}^3$ и энергии диссоциации равной 272 кДж/моль следует, что для сублимации такого количества оксида необходимо затратить энергии всего $0,3 \text{ мДж}$, что на два порядка меньше, чем энергия, выделяющаяся в межэлектродном промежутке. Избыток энергии расходуется на ионизацию газовой среды, нагрев основного материала образца, излучение и т.д.

Модифицированный слой образованный в результате очистки поверхности с энергией в импульсе 0,4Дж содержит в себе нитриды, что подтверждается элементным составом и дифрактограммой снятой с поверхности образца (Рисунок 44). Из графика распределения азота в глубину образца видно, что весь азот находится в поверхностном модифицированном слое. Дифрактограммы показывают наличие образования нитридной фазы (Fe_3N).

Так же, модифицированный слой стоек к химическому травлению 5% раствором азотной кислоты. Это связано с перекристаллизацией железа под действием высокой температуры, а затем очень быстрого охлаждения. В результате чего идет образование мелкозернистой структуры (в материаловедении это называется процессом нормализации) вплоть до появления аморфного железа. Это происходит за счет того, что степень переохлаждения настолько велика ($\sim 10^{15} \text{C/c}$) что центры кристаллизации не успевают образоваться.

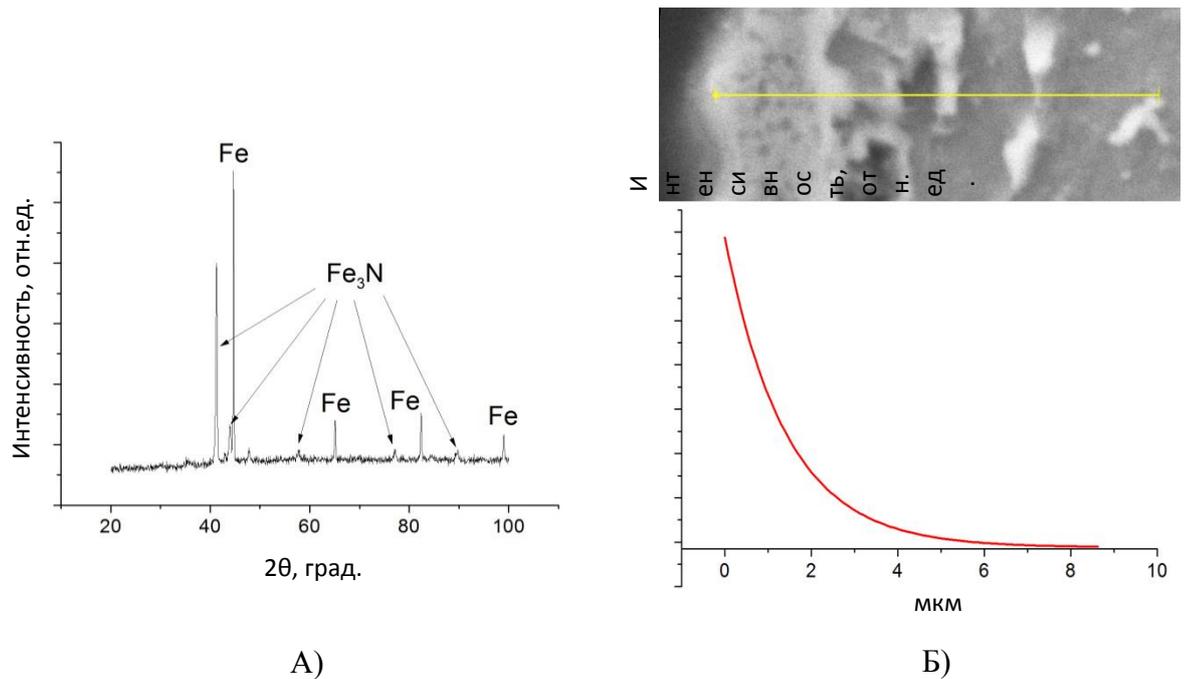


Рисунок 44. А) Дифрактограмма образца обработанного с энергией 0,4Дж, Б) распределение азота по линии в глубину образца сделанное на поперечном сечении.

Анализ полученных данных показывает, что поверхность, полученная при обработке образца с оксидной пленкой 0,5мкм, имеет рельеф, структуру, элементный и фазовый состав такой же, как у обработанной поверхности образца без окалины (См. Глава 4). Это говорит о том, что пленки толщиной до 0,5мкм не сильно сказываются на процессе обработки.

5.2 Обработка поверхности стали с оксидной пленкой толщиной 10мкм.

Эксперименты для удаления толстых оксидных пленок проводились на образцах из холоднокатаной стали 08КП. Для нанесения слоя окалины образцы отжигались, в муфельной печи при температуре 600°C в течении 15мин. Толщина слоя определялась по поперечному сечению образца (Рисунок 45).

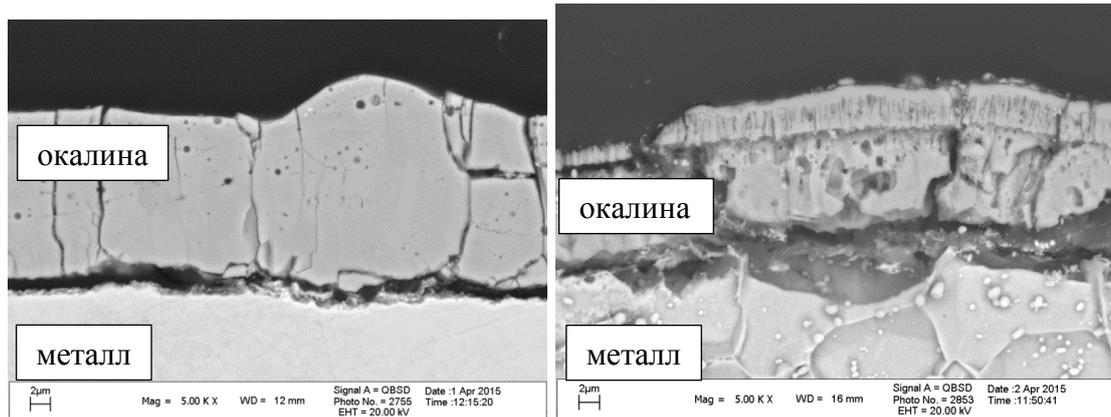


Рисунок 45. Слой окалины на металлическом образце.

Из фотографии видно, толщина слоя окалины составляет $\sim 10 \div 15$ мкм, а структура его состоит из двух слоев с разной величиной зерна, что связано с разной скоростью остывания образца. Обработка производилась в аргоне, поскольку слой окалины довольно толстый (см. раздел Выбор рабочего газа). По данным элементного состава можно говорить о том, что слой оксида полностью состоит из FeO. Так как содержание железа и кислорода практически одинаково.

Для изучения механизма удаления окалины с поверхности металла проводилась обработка в четырех энергетических режимах. При обработке стали с энергией импульса равной 0.6мДж на поверхности видны отдельные кратеры оставленные искровыми разрядами (Рисунок 46). Места воздействия искрового канала на поверхность характеризуются измененной структурой поверхности. Поверхность становится гладкой и покрытая трещинами, появление которых вызвано термическими напряжениями, возникающими в процессе быстрого нагрева и резкого охлаждения.

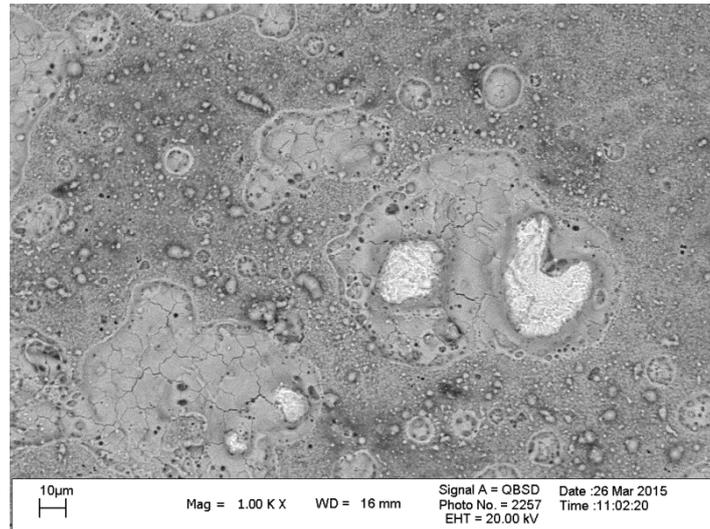


Рисунок 46. Поверхность образца после обработки с энергией в импульсе 0.6мДж.

На фото видно, что в некоторых местах следы от разрядов оставляют небольшие по площади эрозионные следы, а в других большие пятна расплавленной окалины в плоть до обнажения металла. Вероятно, это связано с количеством импульсов, приходящимся на эту площадь.

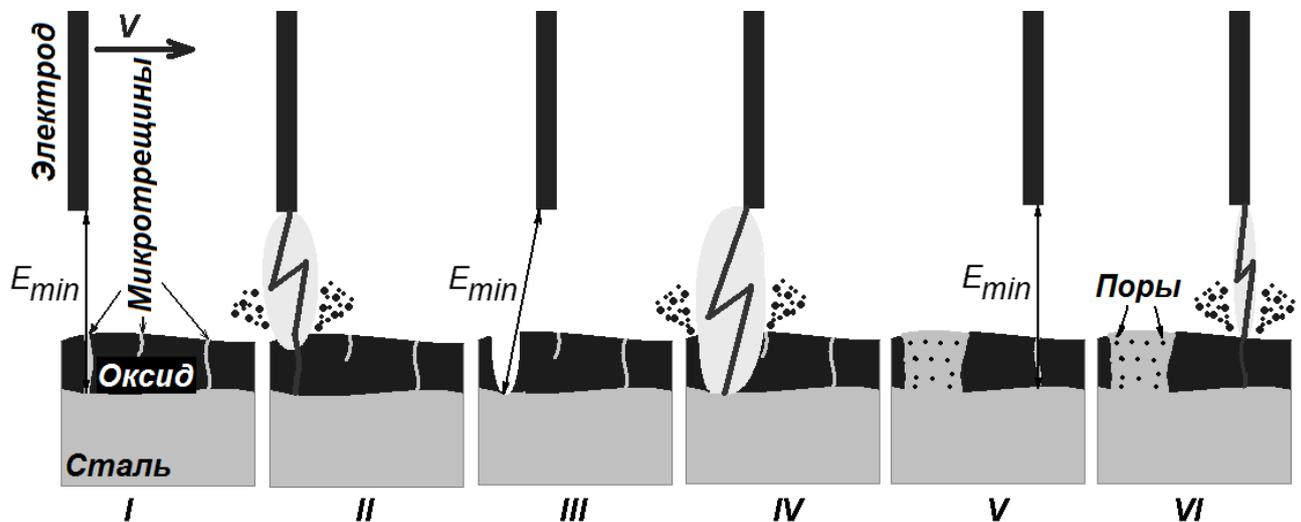


Рисунок 47. – Механизм формирования морфологии поверхности стали при электроискровой обработке.

Искровой пробой происходит в месте, с наибольшей напряженностью электрического поля. В данном случае напряженность электрического поля в основном зависит от двух факторов: микронеровностей и диэлектрической пленки на поверхности образца в роли, которой

выступает оксид железа (FeO). Двух валентный оксид железа имеет диэлектрическую проницаемость в ~14 раз выше, чем газ и лежит тонким слоем толщиной в 10 мкм (как известно тонкие пленки обладают существенно более высокой диэлектрической прочностью, чем массивные образцы). Это позволяет говорить, что пробой будет возникать в месте дефектов и неоднородности оксидной пленки. Механизм образования такой поверхности можно представить следующим образом (Рисунок 47). Первый пробой происходит в месте дефекта (трещины) оксидной пленки. В результате чего часть пленки диссоциирует и на поверхности образуется микро кратер диаметром в несколько микрон. Поскольку микро кратер представляет неровность в этом месте электрическое поле неоднородно, а толщина пленки внутри кратера меньше чем основного слоя и покрыта трещинами (Рисунок 48) образовавшимися в результате расплава оксида и его быстрого охлаждения.

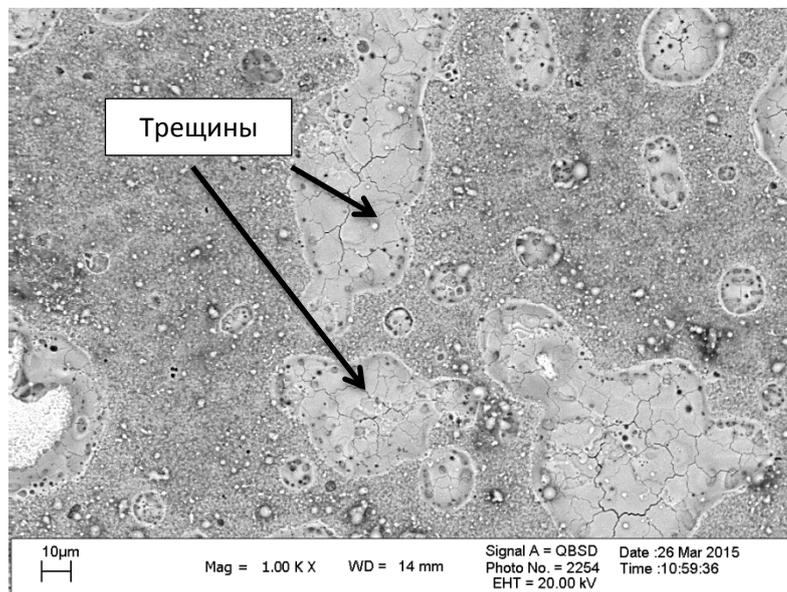


Рисунок 48. Поверхность стали обработанной с энергией в импульсе 1 мДж

Это приводит к тому, что второй и последующие пробои с большой долей вероятности произойдут в месте образования микро кратера. В результате площадь кратера увеличивается. Поскольку электрод-инструмент двигается над поверхностью и газовый промежуток между кратером и электродом возрастает, наступает такой момент, когда диэлектрическая прочность газового промежутка становится больше диэлектрической прочности в месте другого дефекта на поверхности материала. Это приводит к возникновению пробоя в другой области образца.

При обработке стали с энергией импульса равной 7 мДж поверхность принимает следующий вид Рисунок 49.

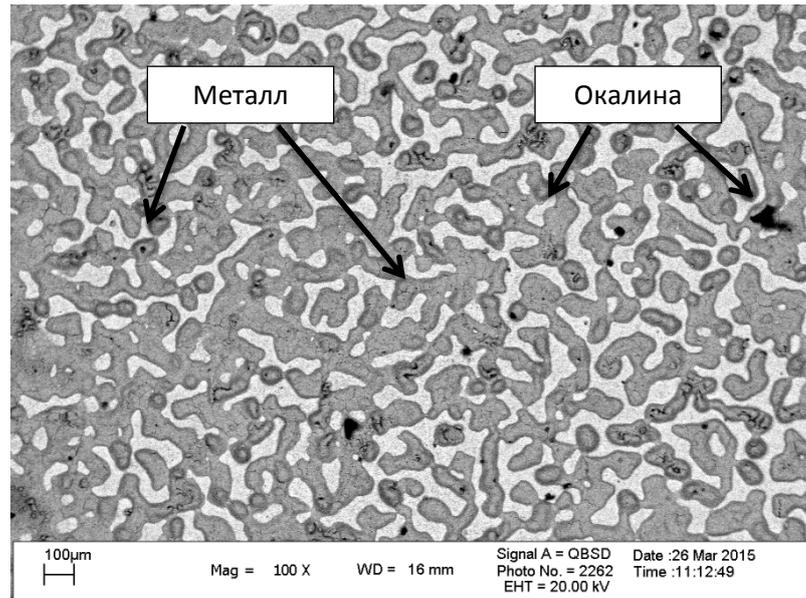
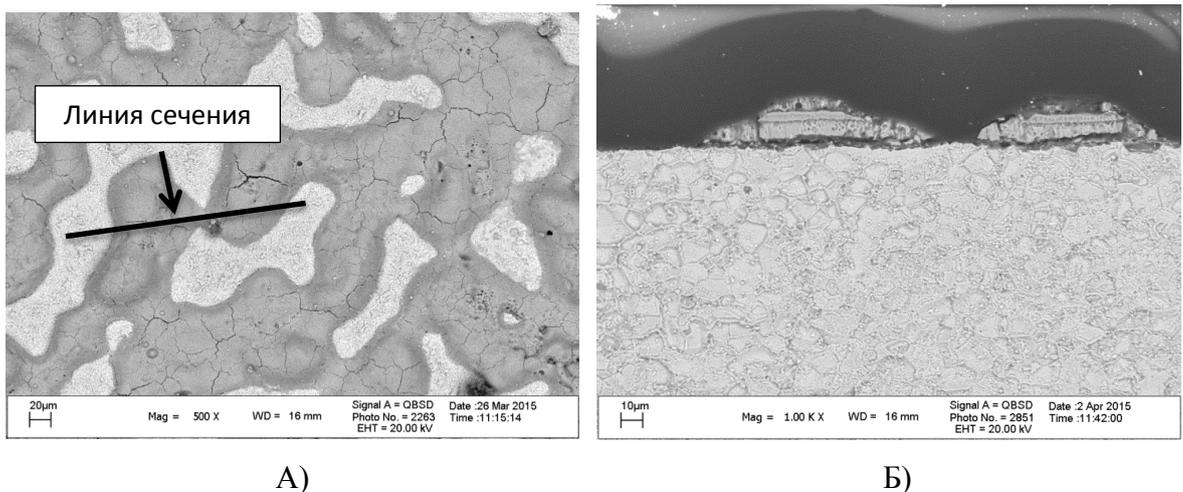


Рисунок 49. Поверхность стали обработанной с энергией в импульсе 7 мДж.

В результате обработки на поверхности наблюдаются участки свободные от окалины и участки с окалиной. Внешне поверхность выглядит как поверхность земли с множеством озер разной величины, которые занимают 30% площади всей поверхности.

Если разрезать образец, как показано на Рисунке 50А. То видно, что внутри окалина имеет разную структуру. Центральная часть имеет структуру исходного слоя (после отжига образцов в муфельной печи Рисунок 50Б), а по краям и сверху структура отличится от исходной.



А)

Б)

Рисунок 50. Сталь обработанная с энергией в импульсе 7 мДж: А - поверхность стали; Б – поперечное сечение.

Это происходит в результате расплавления окалины в зоне воздействия искрового разряда и растекание ее за счет силы поверхностного натяжения к зоне, где не было расплавления.

При увеличении энергии импульса до 30 мДж поверхность на поверхности остается еще меньше окалины, в виде продолговатых островков и шариков диаметром от 20 мкм до 80 мкм (Рисунок 51).

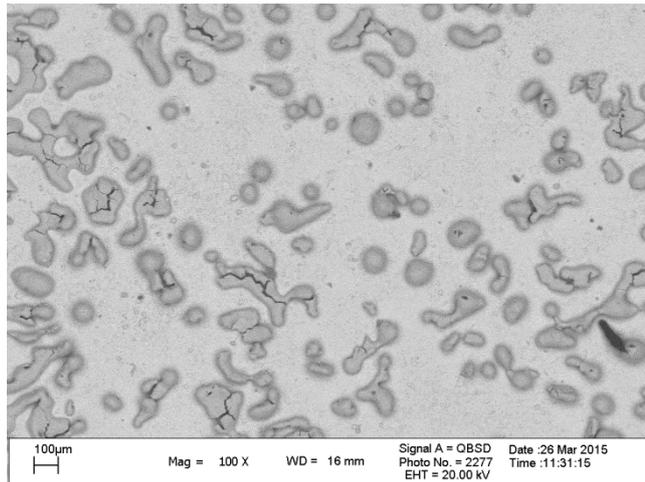


Рисунок 51. Поверхность стали обработанной с энергией в импульсе 30 мДж.

Если посчитать площадь очищенной поверхности можно сказать что удаляется ~70% оксидной пленки поверхности образца. Дальнейшее увеличение энергии в импульсе (до 100 мДж) приводит к тому, что на поверхности остаются только шарики окалины (Рисунок 52), а очищенная поверхность составляет те же ~70%. Но при этом диаметр шариков окалины составляет от 100 мкм до 150 мкм. Так же на поверхности появляются шарики металла диаметром $\sim 10 \text{ мкм} \div 20 \text{ мкм}$.

Увеличение шариков окалины можно связать с тем, что при увеличении энергии в импульсе происходит расплав большей площади окалины. А также 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.

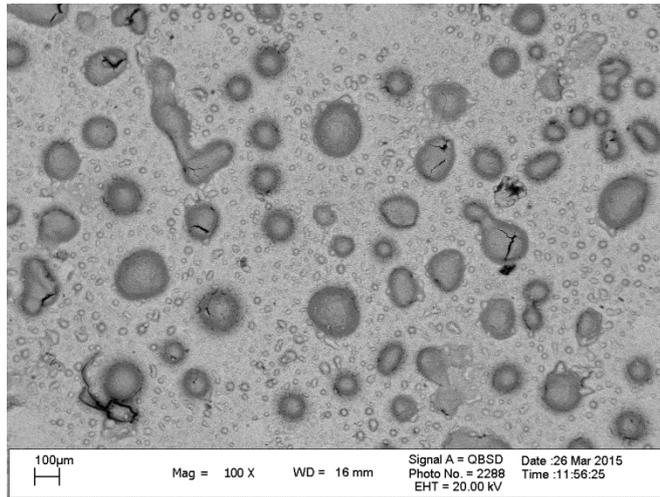


Рисунок 52. Поверхность стали обработанной с энергией в импульсе 100 мДж.

Образование шариков металл происходит в результате разбрызгивание 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 20.

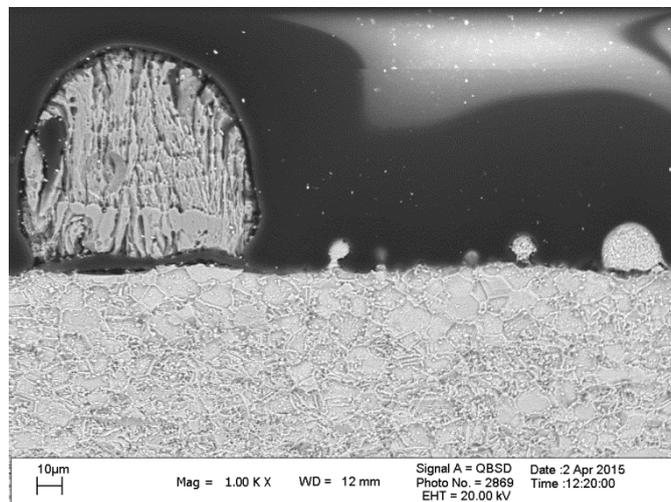


Рисунок 53. Поперечное сечение образца обработанного с энергией в импульсе 100 мДж.

На фото можно увидеть, что шарики окалины не прочно лежат на поверхности. Этот факт подтверждается так же тем, что шарики окалины легко удаляются с поверхности механическим воздействием (жесткой кистью). Шарики имеет столбчатую структуру (Рисунок 21 а).

Так же на Рисунке 53 отчетливо видно, что поверхностный слой металла в местах очищенных от окалины не модифицирован. Это связано с тем, что при таких плотностях

энергии на единицу площади (500 Дж/см^2) и очень коротким временем воздействия (порядка 40 мкс) на поверхности образуется микро взрыв, который приводит не к плавлению металла, а его сублимации и разбрызгиванию с последующей конденсацией на уже остывающую поверхность. Разбрызганный металл садится на поверхность в виде шариков с мелкозернистой структурой (Рисунок 54Б). Мелкозернистая структура образуется в результате высокой степени переохлаждения в момент касания капли с остывающей поверхностью образца.

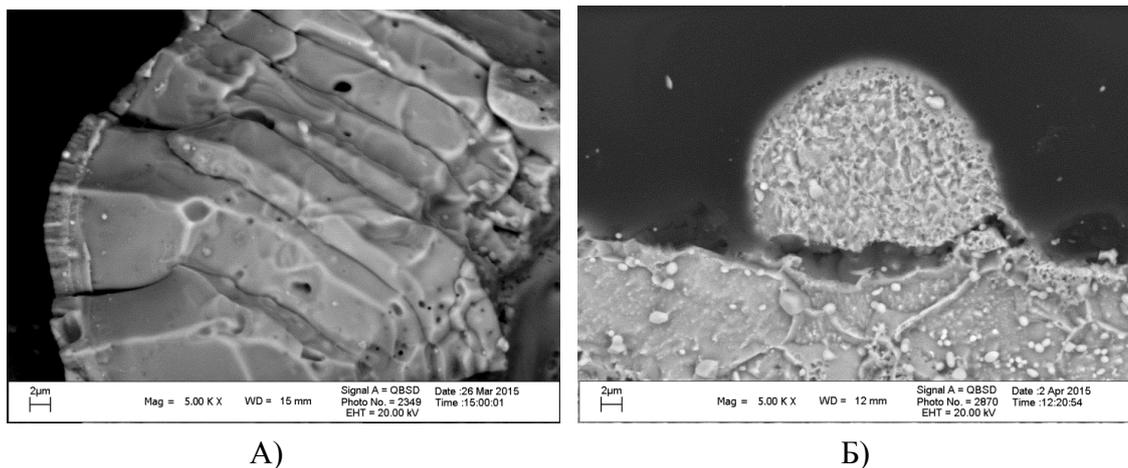


Рисунок 54. Структура шариков: А) – окалины; Б) – металла.

Вывод: подводя итог можно сделать вывод, что увеличивать энергии в импульсе выше 30 мДж при удалении пленок толщиной $\sim 10 \text{ мкм}$ не целесообразно, поскольку на поверхности не наблюдается уменьшения остаточной окалины и при этом образуются шарики металла, делающие поверхность неровной и неоднородной.

5.3 Электродная система позволяющая производить полное удаление слоя окалины

Как было показано в предыдущем параграфе при обработке оксидной пленки толщиной 10мкм нельзя назвать успешным поскольку на поверхности остаются шарики окалины.

Для того чтобы удалить остатки окалины с поверхности была изменена конфигурация электродной системы. Теперь при обработке электрод острие находится под обрабатываемой поверхностью как показано на Рисунке 55.

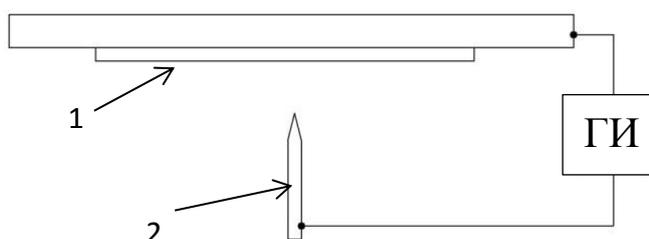


Рисунок 55. Электродная система: 1 – обрабатываемая поверхность; 2 – электрод острий.

При таком расположении электродов окалина в процессе обработки полностью удаляется с поверхности образца (Рисунок 56).

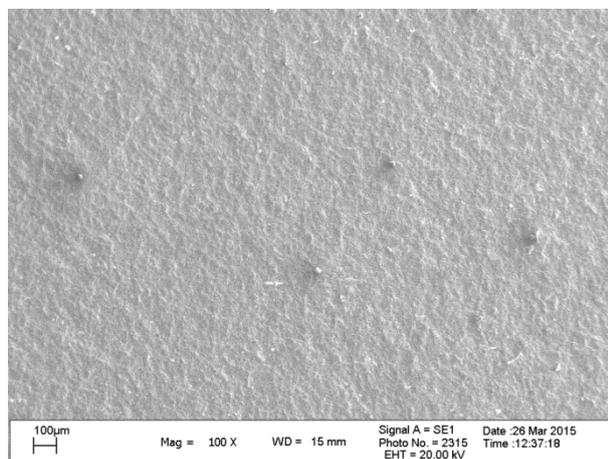


Рисунок 56. Очищенная поверхность с измененной конфигурацией электродной системой.

После обработки в камере под электродом образовался осадок, состоящий из двух составляющих:

1. Мелкодисперсный порошок чёрного цвета. Из элементного состава видно, что данный порошок состоит из железа и кислорода (Рисунок 57А).

2. Гранулы черного цвета с размером от долей миллиметра до 1 миллиметра в зависимости от режима обработки. Элементный состав гранул включает в себя примерно одинаковое количество железа и кислорода (Рисунок 57Б).

3. Частички отколовшейся окалины, не подвергшейся расплавлению (Рисунок 57Б).

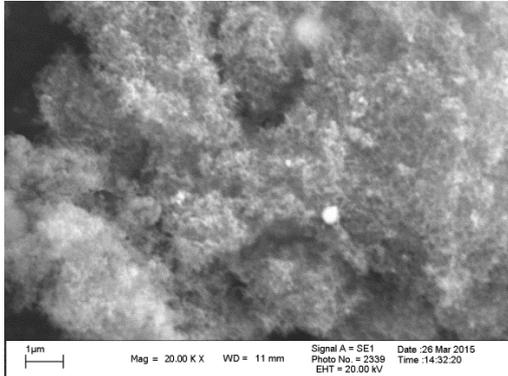


Таблица 6. Элементный состав.

Элемент	Атом. %
O	39,13
Fe	52,61
C	8,26

А)

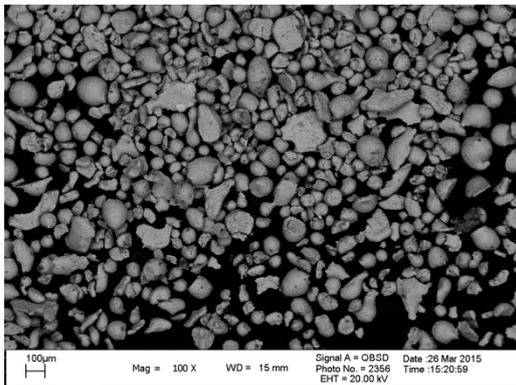


Таблица 7. Элементный состав.

Элемент	Атом. %
O	48,31
Fe	38,57
C	13,12

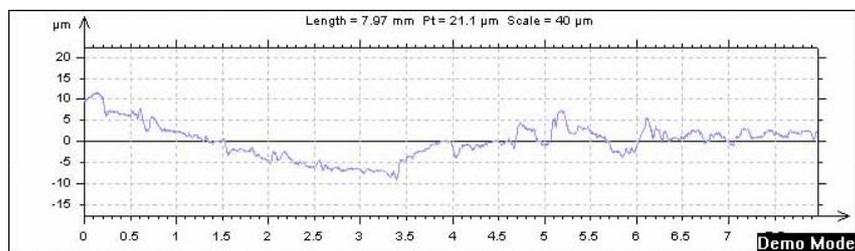
Б)

Рисунок 55. Фото и элементный состав: А) мелкодисперсный порошок; Б) круглые гранулы и частички отколовшейся окалины.

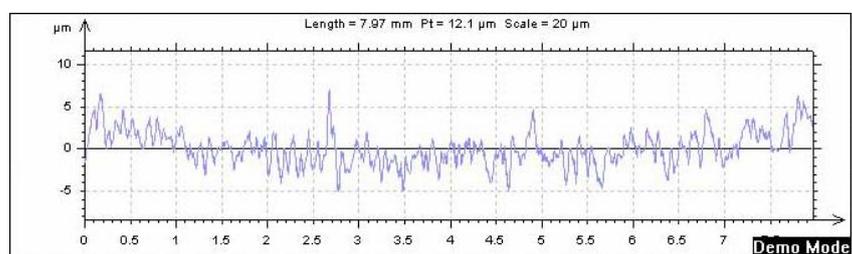
Принимая во внимание вышеизложенное, процесс удаления окалины с поверхности металла представляется следующим образом. В первый момент времени генератор импульсов формирует высоковольтный импульс, приводящий к образованию начального электрического канала. Затем накопленная энергия в низковольтной части источника питания начинает передавать в искровой канал. В результате быстрого ввода энергии часть окалины с поверхности переходит сразу в газообразное состояние (сублимирует). По мере разогрева слоя окалины она начинает плавиться и под действием сил поверхностного натяжения скатываться в капли которые в свою очередь под действием гравитации осыпаются вниз тем самым удаляясь с поверхности. Одновременно с этим процессом из-за разности температурных расширений окалины и стали часть ее откалывается и разбрасывается под действием газодинамических

процессов протекающих в момент искрового разряда. После завершения электрод сдвигается и процессы повторяются.

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



А)



Б)

Рисунок 58. Поверхность образца: А – до обработки; Б – после обработки.

Таким образом, при изменении конфигурации электродной системы поверхность очищалась на 99% (Рисунок 56). Причем энергия в импульсе составляла всего ~ 30 мДж. Время обработки одного квадратного метра, с частотой следования импульсов 5000 Гц скоростью движения электрода 40мм/с и расстоянии между строками 1мм, составит 7часов при полных затратах энергии $2\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. Поверхность образца при этом будет однородна, и иметь развитый игольчатый рельеф (Рисунок 58).

Выводы по главе:

- В процессе воздействия на поверхность искрового разряда происходит сублимация окалины с поверхности образца.
- При расплавлении окалины и последующего сворачивания в шарики на материал действует гравитационная сила, благодаря которой окалина отрывается от поверхности и падает в низ.
- За счет разного коэффициента теплового расширения кусочки окалины просто отрываются от образца и падают вниз. Причем если бы высоковольтный электрод находился

над поверхностью, то этот механизм бы действовал тоже, но окалина оставалась бы на поверхности и следующими разрядами переплавлялась повторно.

Заключение.

В результате проделанной работы получены следующие научные и технические результаты:

1. Разработана лабораторная электроискровая установка для очистки и модифицирования поверхности металла позволяющая обрабатывать образцы размером до 100мм x 100мм x 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 аperiodический 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 интерметаллид 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 ~ 2мкм и размер зерна много меньший, чем исходный образец, а слой полученный в азоте имеет толщину ~ 1мкм и такой же размер зерна.

3. Поверхность стали, обработанная 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_3N .

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 $2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$.

Список литературы

1. http://www.worldsteel.org/publications/Infographics/content/09/text_files/file0/document/WSA01-10%20WSIF%20infographic%202015%20outline.pdf (дата обращения 11.09.2015 г.)
2. «Стратегия развития металлургической промышленности России на период до 2020 года». Утверждена приказом №150 Минпромторга России от 18 марта 2009 г.
3. Малахов А. И., Жуков А. П. Основы металловедения и теории коррозии. – М.: Высш. школа, 1978. – 192 с.
4. ISO 8501-1. Подготовка стальной основы перед нанесением красок и подобных покрытий. Визуальная оценка чистоты поверхности Часть 1. Степени ржавости и степени подготовки непокрытой стальной основы и стальной основы после полного удаления прежних покрытий.
5. ГОСТ 9.402-80. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей перед окрашиванием.
6. Смирнов Н. С., Простаков М. Е., Липкин Я. Н. Очистка поверхности стали. – Металлургия, 1978. – С. 230.
7. Малышев Г. П., Кулик П. С. Исследование возможности использования бластинговой технологии в металлургическом производстве. – 2012. – С. 35-39.
8. Царук О. В., Койда С. Г. Способы очистки металлических поверхностей. – 2011. – С. 149-156.
9. Вайншток И. С. Ультразвук и его применение в машиностроении. – 1958. – С. 140.
10. Коростелева Т. К. и др. Динамика стравливания окалины с низкоуглеродистой стали в кислотах //Протестион оф металс. – 1989. – Т. 25. – №. 3. – С. 405.
11. Грилихес С. Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов// Л.: Машиностроение. – 1983. – С .101.
12. Терехов В. П. Очистка поверхности проволоки дуговым разрядом // Бюл. ин-та «Черметинформация». – 1976. – №7. – С. 49-50.
13. Сенокосов Е. С., Сенокосов А. Е. Плазма, рожденная Марсом // Металлоснабжение и сбыт. – 2001. – №4. – С. 50-51.
14. Сенокосов Е. С., Сенокосов А. Е. Плазменная электродуговая очистка поверхности металлических изделий // Металлург. – 2005. – №4. – С. 44.
15. Филиппов А. А., Гущин А. Н., Пачурин Г. В. Электронно-плазменная очистка от окалины поверхности металлопроката под калибровку // Технология металлов. – 2007. – №1. – С. 7-10.

16. P. Gupta, G. Tenhundfeld, E.O. Daigle, D. Ryabkov, and B. Calliham. Next Generation Cleaning & Surface Modification Technology // Wire & Cable Technology International. – XXXI. – P. 52.
17. Andrews E. H., Daigle E. O., Popov C. C. Benefits Of The Electro Plasma Processing // Wire & Cable Technology International. – 2001. – №7. P. 54-56.
18. Генгринович В. А., Лягинсков В. В., Ройх И. Л. Влияние параметров тлеющего разряда на эффективность ионной бомбардировки и очистки поверхностей //Физика и химия обработки материалов. – 1968. – №. 5. – С. 28-30.
19. Немошкаленко В. В., Сенкевич А. И., Николаев Л. И. Очистка образцов тлеющим разрядом //Заводская лаборатория. – 1972. – Т. 8. – С. 952-953.
20. Болотов Г.Б. Болотов М.Г. Рыжов Р.Н. Очистка тлеющим разрядом металлических поверхностей перед диффузионной варкой и пайкой в вакууме// Серия Машинобудування. – 2009.- №57.- С. 124-127.
21. Костик В. О., Дьяченко С. С. Прогрессивный метод очистки окалины с круглого проката //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – №. 3. – С. 11-15.
22. Погребняк А. Д. и др. Модификация свойств металлов под действием мощных ионных пучков //Изв. вузов. Физика. – 1987. – №. 1. – С. 52-65.
23. Chistjakov S. A., Pogrebnjak A. D., Remnev G. E. Dynamical processes and changes in metal structure induced by high power ion beams //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1989. – Т. 42. – №. 3. – С. 342-345.
24. Ремнев Г. Е. Модификация материалов с использованием мощных ионных пучков // Изв. ТПУ. – 2000. – Т. 303. – №. 2. – С. 59-70.
25. Remnev G. E., Shulov V. A. Application of high-power ion beams for technology //Laser and particle beams. – 1993. – Т. 11. – №. 04. – С. 707-731.
26. Шулов В.А. Ночевная Н.А. Ремнев Г.Е. и др. Применение обработки мощными ионными пучками для ремонта и очистки деталей.// Письма ЖТФ. - 1991. - т.17. - С.38-42.
27. Зубарев Г.И. Исаков И.Ф. Ночевная Н.А. Ремнев Г.Е. Патент РФ №2009269. Способ восстановления эксплуатационных свойств деталей машин.// Приоретет: 10,02,92,БИ. – 1992. - №5.
28. Гарбер С. – В кн.: Листовой прокат. Пер. с англ. М., Metallurgizdat, 1963, С.37-54.
29. Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М., Шахно Е.А. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 103 с.
30. Вейко В. П., Либенсон М. Н. Лазерная обработка //Л.: Лениздат. – 1973.- С. 192.
31. Вейко В. П., Шахно Е. А. Индуцированное лазером локальное осаждение тонких пленок //Оптический журнал. – 1998. – Т. 65. – №. 10. – С. 102-107.

32. Лукьянчук Б. С., Жэнг Ю. В. Лу ИФ К вопросу о механизме сухой лазерной очистки //Известия РАН, сер. физ. – 2001. – Т. 65. – №. 4. – С. 591-600.
33. Булат В. Е., Эстерлис М. Х. Очистка металлических изделий от окалины, окисной пленки и загрязнений электродуговым разрядом в вакууме //Физика и химия обработки материалов. – 1987. – №. 3. – С. 49-53.
34. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – Машиностроение, 1988.- С. 240.
35. Сенокосов Е. С., Сенокосов А. Е. Плазма, рожденная Марсом //Металлоснабжение и сбыт. – 2001. – №. 4. – С. 50-52.
36. Золотых Б. Н. Физические основы электрофизических и электрохимических методов обработки //М.: МВИССО РСФСР. – 1975. – С. 106.
37. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Электрическая эрозия металлов //Л.: Госэнергоиздат. – 1944. – С. 205.
38. Ставицкий Б. И. Из истории электроискровой обработки материалов //Электронная обработка материалов. – 2010. – №. 4. – С. 264.
39. Золотых Б. Н., Постаногов В. Х., Батьков А. А. Электроэрозионная обработка–основа создания уникальных деталей летательных аппаратов //Электронная обработка материалов. – 2000. – Т. 2. – С. 4-8.
40. Журин А. В. Методы расчета технологических параметров и электродов-инструментов при электроэрозионной обработке: дисс.... канд. техн. наук: 05.03. 01 //Тула: ТГУ. – 2005. – С. 132.
41. Золотых Б. Н., Мельдер Р. Р. Физические основы электроэрозионной обработки// М.: Машиностроение. – 1977. – Т. 42. – С. 8.
42. Артамонов Б. А., Волков Ю. С. Анализ моделей процессов электрохимической и электроэрозионной обработки //М.: ВНИИПИ. – 1991. – С. 11.
43. Волосатов В. А. Справочник по электро-химическим и электро-физическим методам обработки. – Машиностроение, 1988. – С. 719.
44. Лазаренко Б. Р. Электрические способы обработки металлов и их применение в машиностроении //М.: Машиностроение. – 1978. – С. 40.
45. Абрамсон И. С., Гегечкори Н. М. Осциллографическое исследование искрового разряда //Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1951. – Т. 21. – №. 4. – С. 484-492.
46. Фольрат К. Искровые источники света и высокочастотная кинематография. Физика быстропротекающих процессов. Перевод под ред. НА Златина. I том //М.: Издательство Мир. – 1971. – С. 520.

47. Омаров О. А. и др. К вопросу формирования канала искры //Физика плазмы. – 1978. – Т. 4. – №. 2. – С. 338-346.
48. Драбкина С. И. О канале искрового разряда// Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1951. – с.473-483.
49. Брагинский С. И. К теории развития канала искры //Иурн. эксп. и теорет. физики. – 1958. – Т. 34. – №. 6. – С. 1548-1557.
50. Андреев С. И. Ванюков М.П. Журнал Технической Физики. – 1962.
51. Wanger K.H., Z. Phys., 180, Н. 5, 522-526 (1964)
52. Киселев А. В. Переходные характеристики искрового разряда в газе //Журнал технической физики. – 1969. – Т. 39. – С. 1443.
53. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.
54. Золотых Б. Н. Физические основы электроискровой обработки металлов //М, Гостехтеоретиздат. – 1953. – С. 108.
55. Безрук А. И., Пушков Ю. Т., Ставицкий Б. И. Электрическая эрозия при одиночных униполярных импульсах малой энергии и длительности //Екейтриббая обработка материалов. – 1971. – С. 230.
56. Зайцев А.Н. Электроэрозионно-химическая прошивка отверстий малого диаметра в деталях из высокопрочных сталей и сплавов // М.: ВНИИТЭМР. - 1991. Вып. 2. – С. 48.
57. Тананин А. И. Теория механической обработки материалов и управление качеством продукции //Интеллектуальные системы в производстве. – 2008. – №. 1. – С. 174-181.
58. Верхотуров А. Д. и др. О физической природе эрозии и формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании молибдена пористыми электродами железа //Порошковая металлургия. – 1983. – №. 12. – С. 51-54.
59. Падеров В. П., Виль А. В., Симкин А. В. Расчет мощности потерь в мостовом выпрямителе с активно-емкостной нагрузкой //Электроника и информационные технологии. – 2009. – №. 2. – С. 7.
60. Запорожец В. В., Стадниченко В. М. Методология ускоренной оценки износостойкости образцов с электроискровыми покрытиями //Проблеми трибології. – 2010. – №. 4. – С. 25-32.
61. Михайлюк А. И., Житару Р. П. Особенности механизма пластической деформации электроискровых покрытий и пути повышения их прочностных характеристик при трении //Электронная обработка материалов. – 2008. – №. 5. - С. 49-56.
62. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Физика искрового способа обработки металлов //ЦБТИ ЭП. – 1946. – С. 76.

63. Золотых Б. Н., Коробова И. П., Стрыгин Э. М. О роли механических факторов в процессе эрозии в импульсном разряде //Физические основы электроискровой обработки материалов. М.: Наука. – 1966. – С. 68-72.
64. Верхотуров А. Д. Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей. – Владивосток : Дальнаука, 1992. – С. 224.
65. Гитлевич А. Е., Михайлов В. В., Парканский Н. Я. Ревуцкий ВМ Электроискровое легирование металлических поверхностей. – 1985. – с.195.
66. Лазаренко Н. И., Лазаренко Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей //М.: Машиностроение. – 1976. – С. 44.
67. Самсонов Г. В., Верхотуров А. Д. Закономерности эрозии катода и анода при электроискровом упрочнении //Электронная обработка материалов. – 1969. – №1. – С. 25-29.
68. Немилов Е. Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов// Л.: Машиностроение. – 1989. – С. 164.
69. Верхотуров А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. – Владивосток : Дальнаука, 1995. – С. 323.
70. Давыдов В. М., Ледков Е. А. Влияние нагрева электродов на изменение их массы при электроискровой обработке //Strengthening technologies and coatings. – 2004. – С. 26.
71. Паустовский А. В. и др. Исследование зависимости массопереноса при электроискровом легировании сплавами Ni-Cr-Al от структурных факторов электродов //Электронная обработка материалов. – 2011. – №. 1. – С. 30-36.
72. Паустовский А. В. и др. Оптимизация состава, структуры и свойств электродных материалов и электроискровых покрытий при упрочнении и восстановлении металлических поверхностей //Электронная обработка материалов. – 2013. – №. 1. – С. 26-32.
73. Гордиенко П. С. и др. Электрофизическая модель эрозии электродов при импульсном энергетическом воздействии //Электронная обработка материалов. – 2011. – №3. – С. 15-27.
74. Палатник Л. С. Фазовые превращения при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий //ДАН СССР. – 1953. – Т. 89. – № 3. – С. 455-458.
75. Палатник Л. С. Превращения в поверхностном слое металлов под действием электрических разрядов. – Известия АН СССР, сер.физическая. – Т.15. - №4. – 1951. – С.467.

76. Бакуто И. А., Мицкевич М. К. О факторах, влияющих на образование покрытий при электроискровом способе обработки //Электронная обработка материалов. – 1977. – №. 3. – С. 17-19.
77. Намитоков К. К. Об эрозии электродов при сильнотоочных импульсных разрядах //Журнал технической физики. – 1967. – Т. 37. – С. 993.
78. Намитоков К. К. Электроэрозионные явления //М.: Энергия. – 1978. – С. 456.
79. Лазаренко Б.Р., Бакал Ш.З., Краснолоб К.Я., Белкин П.Н. Влияние давления воздуха на величину электрической эрозии анода. – Электронная обработка материалов. – 1970. – № 1 – С.32-35.
80. Лазаренко Б. Р. и др. Исследование процесса электроискрового легирования в разреженной среде //Электронная обработка материалов. – 1970. – №. 4-С. – С. 13-15.
81. Самсонов Г. В. и др. Электроискровое легирование металлических поверхностей //Киев: Наукова думка. – 1976. – Т. 219. – С. 2.
82. Шумахер Б. Законы проникновения электронов в вещество //Электронно ионно лучевая технология//М.: Металлургия. – 1967. – С. 42-54.
83. Носков Д.А. Роль взрывоподобных процессов при импульсной электроннолучевой обработке материалов // Электронная обработка металлов. 1969. № 2. С. 26–30.
84. Симиян О.Д. Механизм процессов, происходящих при обработке материалов электронным пучком // Физика и химия обработки материалов. 1973. № 2. С. 3–9
85. Хромов В. Н., Кузнецов И. С., Петрашов А. С. Электроискровая обработка поверхностей деталей как способ получения износостойких покрытий из объемных наноструктурированных частиц //Strengthening technologies and coatings. – 2004. – С. 23.
86. Верхотуров А. Д. Электродные материалы для электроискрового легирования// Наука. - 1988. – С. 12.
87. Николенко С. В., Верхотуров А. Д. Новые электродные материалы для электроискрового легирования. – Владивосток : Дальнаука, 2005. – С.218.
88. Шевелёва Т. А. и др. Влияние добавки датолитового концентрата в электродные материалы TiC–Ni–Mo на свойства поверхностного слоя сталей после электроискрового легирования //Электрон ная обработка материалов. – 1991. – №. 1. – С. 26-30.
89. Столин А. М., Мержанов А. Г. Новые износо- и коррозионно-стойкие электродные материалы для электроискрового легирования, полученные методом СВС-экструзии //Техника машиностроения. – 2003. – №. 1. – С. 15-29.
90. Абляз Т. Р., Ханов А. М., Хурматуллин О. Г. Современные подходы к технологии электроэрозионной обработки материалов //Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. – 2012. – С.112.

91. Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Коневцов Л. А. Самсонов ГВ и Лазаренко БР— основатели нового научного направления “Материаловедение электродных материалов для электроэрозионной обработки” //Электрические контакты и электроды. – 2010. – С. 274-287.
92. Верхотуров А. Д. Научные основы формирования легированного слоя при электроискровом легировании: Автореф.... д-ра техн. наук //К.: Ин-т пробл. материаловедения АН УССР. – 1984. – С. 54.
93. Самсонов Г.В., Муха И.М. Анализ данных по износу материала обрабатываемых электродов// Электронная обработка материалов. – 1967. - №3. - с.3-13.
94. Съянов С. Ю. Определение остаточных напряжений, износа инструмента и производительности при электроэрозионной обработке //Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – №. 2. – С. 59-61.
95. Глыбач К. В. и др. Источник питания для электроэрозионной обработки материалов. Авт. свид. № 318453 //Бюл. изобр. и откр. – 1971. – №. 32.
96. Фурсов С. П. и др. Источники питания для электроискрового легирования //Кишинев: Штиинца. – 1983. – С. 118.
97. Ставицкий Б. И. Прецизионное электроискровое оборудование для изготовления деталей изделий электронной техники //Электронная обработка материалов. – 2001. – №. 2. – С. 62-77.
98. Лившиц, А. Л. Генераторы периодических импульсов сильного тока / А. Л. Лив-шиц, И. С. Рогачев. – М.-Л. : Гос. энергет. изд-во, 1959. – С. 199.
99. Соболевский А. Г. Импульсная техника// Госэнергоиздат. – 1958. – С. 168.
100. Фурсов С. П. Генераторы электрических импульсов для электроискровой обработки токопроводящих материалов //изд.«Карта Молдовеняскэ», Кишинев. – 1967. – С. 140.
101. Воеводин С. В., Горохов В. В., Карелин В. И. Малогабаритный высоковольтный наносекундный генератор Аркадьева-Маркса на воздушных разрядниках //Приборы и техника эксперимента. – 2000. – №. 3. – С. 67-71.
102. Суленушкин Е.Н. Импульсное устройство высокой частоты для электроэрозионной обработки металлов. – авт.свид. - №136161. – Бюлл.изобр. – 1961. - №4.
103. Доронкин Е. Ф., Воскресенский В. В. Транзисторные генераторы импульсов. – Связьиздат. - 1965. – С. 103.
104. Баранова Л. В. Металлографическое травление металлов и сплавов: Справочник. – Металлургия, 1986. – С. 257.
105. Лякишев Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3-х томах //М.: Машиностроение. – 1997. – С. 586.

Приложение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 130247

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013100822

Приоритет полезной модели 09 января 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 июля 2013 г.

Срок действия патента истекает 09 января 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.И. Симонов



Автор(ы): *Журавлев Михаил Валерьевич (RU), Ремнев Геннадий Ефимович (RU), Слободян Михаил Степанович (RU), Шубин Борис Григорьевич (RU)*

RU 130247 U1

ООО «Инженерно-физический центр»

634041, г. Томск, ул. Советская 63, а/я 224, тел/факс: 382-2 –419-158, e-mail: BannovaKA@yandex.ru
 ИНН 7014027830 КПП 701701001 р/с 40702810964010129950 ТОСБ №8616 в г. Томске
 к/с 30101810800000000606 БИК 046902606 ОКОНХ 95130 ОКПО 49396096

Исх. № 103/исх от «06» июня 2015 года

Акт

Об использование результатов диссертационной работы Журавлева Михаила Валерьевича в ООО «Инженерно-физический центр»

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Журавлева Михаила Валерьевича на тему «Очистка и модификация поверхности нелегированной низкоуглеродистой стали электроискровым методом в газе атмосферного давления» использованы в работе предприятия. Разработанный с участием Журавлева М.В. метод очистки поверхности металла лег в основу разработки комплекса для очистки труб от ржавчины, образовавшейся в процессе хранения.

Директор ООО «ИФЦ»

Член комиссии



/Абрамов В.С./

/Баннова К.А./