

В целом оборудование, техпроцесс, а также материал ионно-модифицированных слоев должны иметь необходимое алгоритмическое сопровождение, ориентированное на применение микро-процессорной и компьютерной техники различного уровня для решения как технологических, так и металлургических задач. Намечается движение в направлении создания «многозонных» покрытий, обеспечивающих в каждой из рабочих зон минералоинструмента необходимый набор свойств.

Главное – создание нового поколения интеллектуальных технологических модулей, обеспечивающих реализацию получения многофункциональных композиционных покрытий, придания им антифрикционных, износостойких и коррозионно-стойких свойств, которые всегда были и остаются перспективным направлением в машиностроении. Целесообразность выше предложенного определяется из соотношения эффект/цена.

Литература.

1. Гадалов, В.Н. Разработка и исследование минералокерамики при обработке серого и специального чугуна / В.Н. Гадалов, Е.В. Павлов, И.В. Павлов // *Материалы и упрочняющие технологии: сб. матер. X юбилейной Росс. науч.-техн. конф. с междунар. уч-ем, посвященной 40-летию образования Курского государственного технического университета*. Курск. 2003. Ч.1. – С. 76-84.
2. Семенов, А.П. Упрочнение материалов вакуумными ионно-плазменными методами: справочник / А.П. Семенов // *Инженерный журнал*. 2000. № 1. – С. 3-8.
3. Павлов, Е.В. Улучшение качества электрофизических покрытий при ротационном выглаживании минералокерамическим инструментом / Е.В. Павлов, И.В. Павлов // *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: Материалы VI междунар. научно-техн. конф.*: в 2 ч. Ч.2. Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2008. – С. 35-41.
4. Павлов, И.В. Универсальная установка для упрочнения поверхности / И.В. Павлов, Е.В. Павлов // *Образование, наука, производство и управление: Сборник научных и научно-метод. докладов Междунар. научно-практич. конф.*: в 2 томах. Т.1. Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2009. – С. 174-176.
5. Павлов, И.В. Вопросы оценки качества поверхности электрофизического покрытия после выглаживания минералокерамикой / И.В. Павлов, Е.В. Павлов // *Образование, наука, производство и управление: Сборник научных и научно-метод. докладов Междунар. научно-практич. конф.*: в 2 томах. Т.1. Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2009. – С. 176-178.
6. Павлов, Е.В. Упрочнение и повышение режущих свойств минералокерамического инструмента при ионно-плазменном нанесении композиционных покрытий / Е.В. Павлов, И.В. Павлов // *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: Материалы VI междунар. научно-техн. конф.*: в 2 ч. Ч.2. Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2008. – С. 31-35.
7. Павлов, Е.В. Лазерная обработка как способ повышения эксплуатационных свойств электроакустических защитных покрытий / Е.В. Павлов, И.В. Павлов // *Физические и компьютерные технологии. Труды 15-ой междунар. научно-техн. конф.* Харьков: ХНПК «ФЭД», 2009. – С. 370-374.
8. Павлов, Е.В. Исследование технологии упрочнения коленчатых валов с применением лазерной обработки / Е.В. Павлов, И.В. Павлов // *Физические и компьютерные технологии. Труды 15-ой междунар. научно-техн. конф.* Харьков: ХНПК «ФЭД», 2009. – С. 374-377.

#### **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НАПЛАВКИ ПОКРЫТИЙ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ В КИСЛЫХ СРЕДАХ\***

*Ю.Н. Сараев<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, В.П. Безбородов<sup>1,2</sup>, к.т.н., доцент, Ю.В. Селиванов<sup>1</sup>, инженер*

*<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, Томск, пр. Академический, 2/4, тел. 8(3822)-286850*

*<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, тел. 8(3822)-419559*

#### **Введение**

Метод наплавки позволяет повышать производительность и качество изделий благодаря упрочнению и восстановлению изношенных рабочих поверхностей, контактирующих с коррозионно-активными средами [1]. Однако этот метод сопровождается появлением в покрытиях различных дефектов. Рост глубины оплавления приводит к увеличению области сенсбилизации, а недостаточное оплавление ведёт к несплавлениям формируемого покрытия с защищаемой поверхностью [2]. Необходимо проведение поиска новых путей решения проблем устранения возникающих недостатков.

При наплавке вследствие действия источника нагрева - электрической дуги происходит расплавление покрытого электрода и частичное оплавление обрабатываемой поверхности. На ней формируется наплавочная ванна, и по мере перемещения источника нагрева относительно поверхности происходит кристаллизация расплавленного металла в виде наплавленного валика, геометрические размеры которого, во многом, определяются процессами, протекающими в этой ванне.

При наплавке на импульсном режиме диаграмма изменения сварочного тока (рисунок 1) существенно отличается от диаграммы с использованием постоянного тока.

Реализация при наплавке этой диаграммы позволяет осуществить периодизацию физических процессов, протекающих в сварочной ванне. В результате действия переменного давления дуги при формировании наплавляемого покрытия металл наплавочной ванны осуществляет возвратно - поступательные движения [3-5]. Такое протекание технологического процесса наплавки позволяет обеспечить цикличность физических процессов на этапах формирования наплавочной ванны и кристаллизации металла из расплава, что способствует активному ее перемешиванию. При этом активное перемешивание сварочной ванны содействует выравниванию её теплосодержания и обеспечивает установление требуемого количества расплавленного металла под дугой к началу действия импульса тока, способствуя уменьшению глубины оплавления. Анализ факторов, влияющих на формирование наплавленного покрытия, показывает, что их можно разделить на две группы. Первая группа выражается показателем, который в процессе наплавки изменить нельзя, - пространственным положением защищаемой поверхности. Вторая группа связана с параметрами режима наплавки, которые можно изменять в ходе технологического процесса. При этом появляется возможность изменять геометрические размеры наплавляемого покрытия: высоту и ширину валика покрытия. Новые возможности по управлению параметрами второй группы факторов заложены в способе наплавки покрытия модулированным током. В этом случае появляется и больше возможностей управлять изменением геометрических размеров наплавляемого покрытия, чем при наплавке постоянным током с ограниченным количеством регулируемых параметров режима.

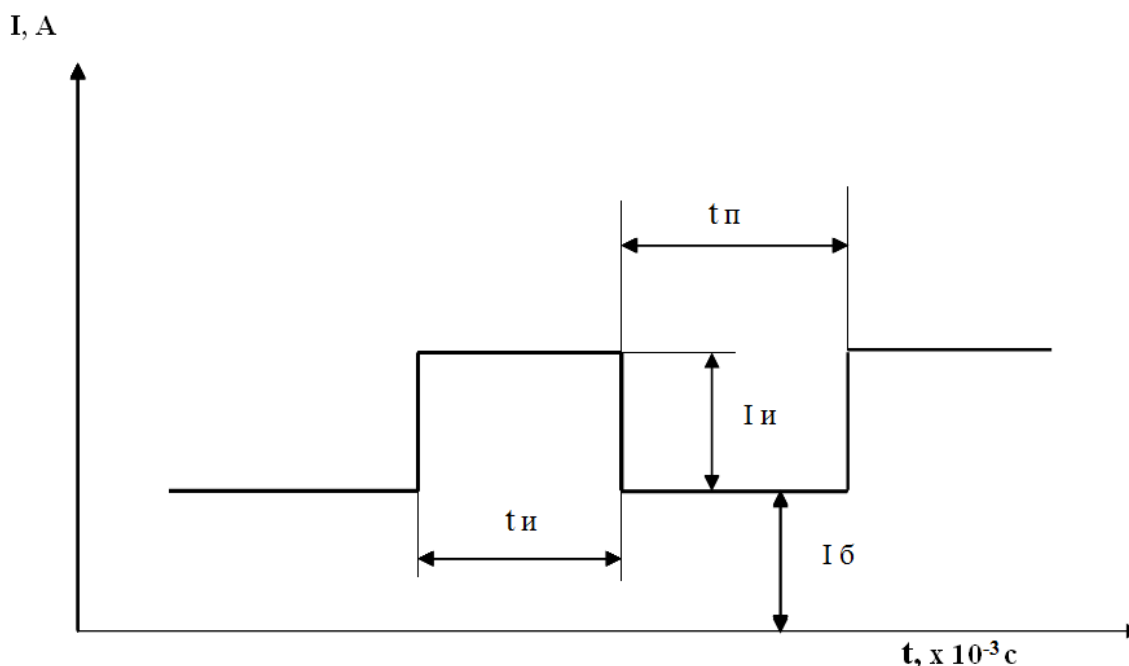


Рис. 1. Схема изменения силы тока наплавки:  $I_и$  - рабочий ток импульса;  $I_б$  - базовый ток;  $t_и$  - время рабочего импульса;  $t_п$  - время паузы.

Дополнительные регулировочные параметры - амплитуда колебаний тока импульса и паузы, их длительность, частота следования позволяют управлять размерами наплавочной ванны, изменять характер плавления и переноса металла, что способствует повышению стабильности формирования наплавляемого покрытия. При этом силы, действующие в наплавочной ванне, периодически изменя-

ются от максимальных (на интервале импульса) до минимальных значений (на интервале паузы), что обеспечивает возвратно - поступательное движение расплавленного металла.

Таким образом, движением металла в наплавочной ванне можно эффективно управлять варьированием силой тока наплавки на интервале импульса. При этом с увеличением силы тока импульса увеличивается давление дуги. В результате этого расплавленный металл более активно вытесняется из под дуги в хвостовую часть наплавочной ванны. На интервале паузы при уменьшении давления дуги пропорционально величине силы тока паузы сварочная ванна стремится вернуться под дугу. Это способствует активному периодическому движению металла в сварочной ванне, выравниванию ее теплосодержания и более равномерному распределению легирующих элементов по всему объему наплавляемого металла. Изменяя параметры процесса наплавки непосредственно в её ходе, можно влиять на геометрические размеры формируемого покрытия: кривизну поверхности, высоту и ширину валика.

Коррозионные испытания сталей, используемых для изготовления оборудования, работающего в условиях применения кислых сред, были инициированы возникшей необходимостью замены выходящих из строя фрагментов и продления тем самым срока службы оборудования в целом. Особенно сильно подвержены коррозионным процессам сварные соединения стенок этих агрегатов, изготовленные из нержавеющей сталей. До настоящего времени в промышленности используются изделия технологического оборудования со сварными соединениями, полученными ручной дуговой сваркой плавящимися электродами и механизированной сваркой. При реализации указанных процессов перенос наплавляемого металла осуществляется сериями коротких замыканий. При этом отделение капли расплавленного металла с торца электрода и ее перенос в сварочную ванну происходит при высоком уровне сварочного тока. Это обуславливает нестабильность процессов в дуговом промежутке и повышенное разбрызгивание электродного металла, что, в конечном счете, ухудшает эксплуатационные свойства сварных соединений. Практика показала, что в процессе длительной эксплуатации указанного оборудования, работающего в активных кислых средах, коррозионный износ металла составляет около 0,1 мм/год. Коррозионные же разрушения сварных соединений достигают 4 - 5 мм/год. Они, как правило, выражены в виде опасной разновидности межкристаллитной коррозии - ножевой, наблюдаемой в ЗТВ основного металла и металле сварного шва. В некоторых случаях коррозия приводит к сквозному разрушению стенки агрегатов. В настоящее время восстановление работоспособности поврежденных сварных соединений сталей на действующем оборудовании производится ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом. Восстановительный ремонт поврежденных коррозией участков сварных соединений заключается в нанесении на них способом наплавки защитного покрытия. Этот технологический процесс сопровождается большим тепловложением в зону сварного соединения, снижает защитный эффект от нанесения наплавленного покрытия, способствует проявлению коррозионных разрушений в этой зоне – ножевой коррозии.

С целью повышения эксплуатационных свойств сварных соединений сталей в работе был использован метод импульсно - дуговой наплавки на сварное соединение. Известно, что данный метод наплавки резко снижает тепловложение в зону сварного соединения, влияет на структуру и свойства сварных соединений из различных сталей [6-8]. Однако в литературе отсутствуют данные о структуре металлов наплавленного покрытия и сварного соединения из нержавеющей сталей и их коррозионных свойствах в азотнокислых средах.

Целью данной работы является проведение анализа влияния используемых технологических приемов и импульсного метода нанесения покрытий для повышения коррозионной стойкости сварных соединений из нержавеющей сталей в азотнокислых средах.

#### **Материалы и методика исследования**

Для проведения исследований были изготовлены сварные соединения пластин из листового проката стали аустенитного класса 12X18H10T размерами 300×150×10 мм. Формирование сварных соединений осуществлялось методом ручной дуговой сварки электродами ОЗЛ - 36 диаметром 3 мм в три прохода сварочным аппаратом МАГМА 315.

Защитные покрытия на сварные соединения наносились методами наплавки - на постоянном токе и импульсном. Оценка коррозионного износа исследуемых сварных соединений проводилась по ускоренному методу. Такие испытания рекомендуются для контроля качества сварного соединения и оценки его склонности к ножевой коррозии. Испытательной средой служил водный раствор 10 %  $\text{HNO}_3$  + 3 %  $\text{HF}$ . Испытания проводились при температуре среды 95 °С. В этих условиях увеличивается скорость перемешивания объема раствора и облегчается подвод окислительных компонентов к

поверхности проб. Испытания состояли из 8 циклов продолжительностью 6 часов каждый. В реальных условиях эксплуатации сварного соединения продукты коррозии постоянно уводятся из рабочего раствора, поэтому в ходе лабораторных испытаний в каждом цикле использовался свежеприготовленный раствор. Коррозионные испытания проб размерами 80×15×10 мм со сварными швами проводились в условиях эксплуатации оборудования - с частичным погружением проб каждого сварного соединения в рабочие жидкости при их воздействии в области ватерлинии. Проведены коррозионные испытания проб сварных соединений после удаления наплавленных покрытий механическим способом. Это позволило обеспечить максимальный контакт сварного соединения с агрессивной средой. Продолжительность испытаний составляла 30 часов. Коррозионная стойкость оценивалась по изменению веса проб с помощью аналитических весов типа ВЛР - 200. Регистрация коррозионных разрушений поверхностных слоев проб производилась по изменению макроструктур сварных швов и зоны термического влияния (ЗТВ). Исследования структур сварных соединений и наплавленных покрытий проводились с помощью оптического микроскопа Axiovert 200 MAT и камеры AxioCam HRc фирмы Carl Zeiss, регистрировались посредством программы AxioVision Rel 4.4. Структуру сварных соединений и наплавленных покрытий выявляли с помощью реактива: 10 мл азотной кислоты, 20 мл соляной кислоты, 20 мл глицерина и 10 мл 30 % - ной перекиси водорода.

#### Результаты и их обсуждение

При рассмотрении причин, определяющих стойкость сварного соединения к коррозионному износу, необходимо выделить природу компонентов сварного соединения как основного фактора, определяющего его фазовый состав и структуру. Пассивность хрома в стали 12X18H10T обусловлена образованием на поверхности тонкой плёнки оксида  $Cr_2O_3$ , малорастворимой в кислоте и воде. Как известно, величина сенсibilизации зависит от размера тепловложения при формировании сварного соединения.

Исследования микроструктуры исходных образцов показали, что исследуемая сталь имеет аустенитную структуру (рисунок 2).

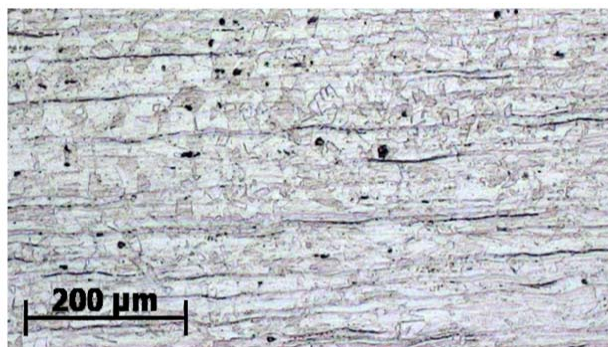


Рис. 2. Микроструктура стали 12X18H10T

Ферритная фаза присутствует в виде отдельных строчек и в виде тонкого слоя по границам зёрен полиэдрического аустенита. Структура металла сварного шва представляет собой столбчатые дендриты (рисунок 3).

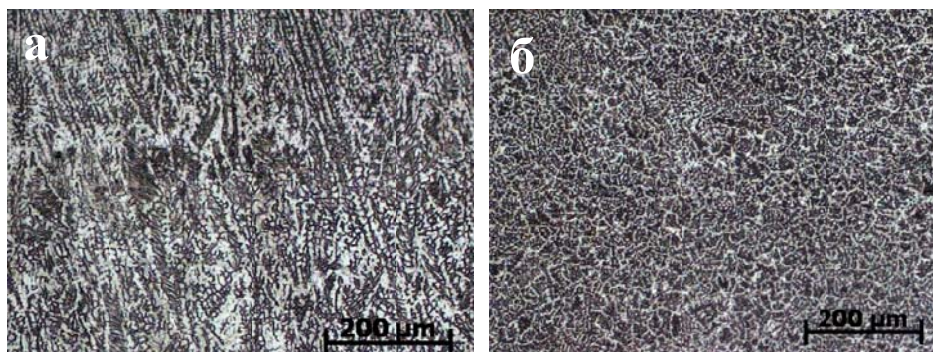


Рис. 3. Структура наплавленного металла покрытия:  
а) постоянный ток, б) импульсно - дуговой метод.

Их ширина и длина дендритов могут достигать 20 мкм и 500 мкм, соответственно. Металл шва проб образцов сварных соединений, выполненных на постоянном токе, в процессе коррозионных испытаний показал относительно низкую стойкость (рисунок 4).

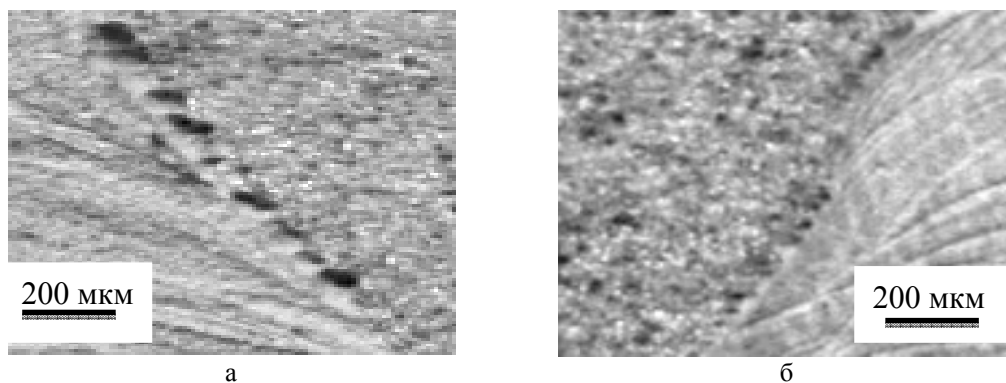


Рис. 4. Характер коррозионных разрушений сварных соединений стали 12X18H10T, полученных: а) на постоянном токе; б) импульсно - дуговым методом.

Наибольшие коррозионные разрушения проб локализованы в ЗТВ сварного соединения. Они представляют собой типичную ножевую коррозию. Картина коррозионного разрушения проб сварного соединения, выполненного на импульсном режиме, значительно отличается - отсутствует ножевая коррозия. Коррозионные разрушения представлены, в основном, в виде отдельных питтингов, локализованных в области ЗТВ.

Анализ зависимостей изменения веса проб от времени коррозионных испытаний (рисунок 5) показал, что наиболее сильно подвержены коррозионному процессу пробы сварных соединений с покрытием после наплавки на постоянном токе, что обусловлено более пористой структурой наплавленного металла и наличием дефектов наплавки в виде несплавлений. По этим полостям в ходе проникает агрессивная коррозионная среда и ускоряются коррозионные разрушения.

Анализ зависимостей скорости коррозии зоны сплавления от времени испытаний показал, что наиболее подвержены коррозии пробы, наплавленные на постоянном токе (рисунок 6). Эти пробы в значительной степени поражены ножевой коррозией в ЗТВ наплавленного покрытия и в металле шва (рисунок 7). Коррозионные разрушения протекают, в основном, в ЗТВ металла сварного соединения. Использование импульсного режима позволяет снизить до 6 раз скорость коррозии соединений по сравнению с полученными на постоянном токе. Анализ результатов коррозионных испытаний проб сварных соединений после удаления наплавленного покрытия также показал повышение коррозионной стойкости зоны шва при нанесении покрытий, выполненных импульсно - дуговым методом. Наибольшие коррозионные разрушения сварных соединений стали локализованы в ЗТВ (см. рисунок 7).

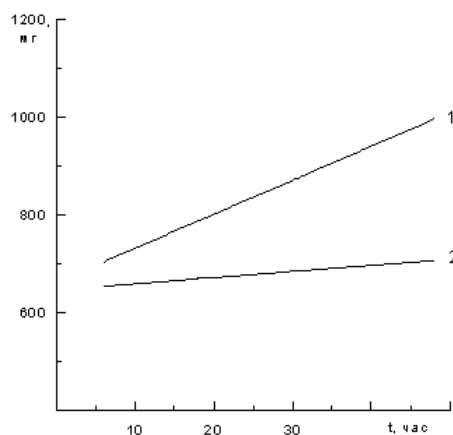


Рис. 5. Зависимость веса проб от времени коррозионного испытания после наплавки покрытия: 1) на постоянном токе, 2) импульсно - дуговым методом.

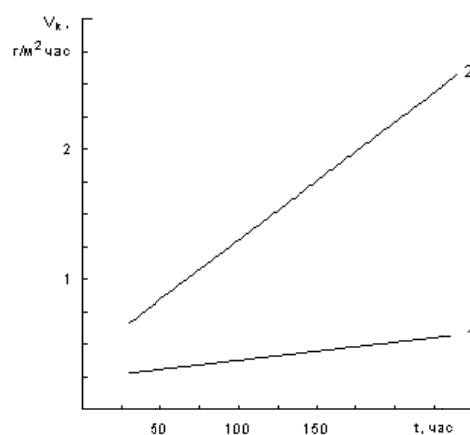


Рис. 6. Зависимость скорости коррозии от времени испытания после наплавки покрытий: 1) на постоянном токе, 2) импульсно - дуговым методом

На образцах, сваренных методом адаптивной импульсно - дуговой сварки, картина коррозионного разрушения меняется. Ножевая коррозия отсутствует. Наблюдается коррозия в виде питтингов, локализованных на границе сварного шва.

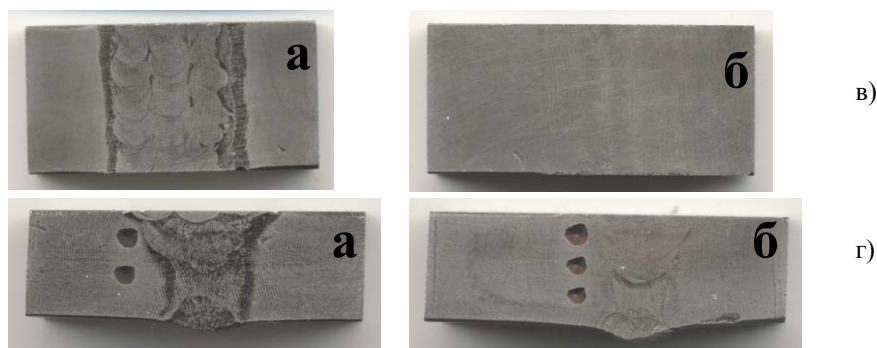


Рис. 7. Макроструктура металла сварных соединений под покрытиями, наплавленными: а) на постоянном токе; б) импульсно - дуговым методом, в) продольный срез, г) поперечный срез

#### Выводы

1. Использование технологического процесса импульсно - дуговой наплавки стали 12Х18Н10Т позволяет при меньшем тепловом воздействии на шов и ЗТВ сварных соединений сталей формировать защитные покрытия с дисперсной структурой.

2. Покрытия с дисперсной структурой, полученные методом импульсно - дуговой наплавки, позволяют в 1,5 - 6 раз снизить скорость коррозии сварных соединений сталей 12Х18Н10Т в активных химических средах.

3. Результаты проведенных исследований можно рекомендовать для использования при наплавке защитных коррозионно - стойких покрытий на рабочие поверхности оборудования химических производств. Импульсный технологический процесс наплавки покрытий на сварные соединения сталей можно эффективно использовать для защиты от коррозии при ремонте оборудования химической промышленности.

**\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по приоритетному направлению деятельности: "Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами" в 2016 -2018 гг., проект № 16-19-10010.**

#### Литература.

1. Фоминых В.П., Яковлев А.П., Ручная дуговая сварка. Издание седьмое исправленное и дополненное. - М.: Высшая школа. - 1986. - 366 с
2. Ищенко Ю.С., Букаров В.А., Пищик В.Г. Оценка величины проплава при сварке неповоротных стыков//Сварочное производство. - 1981. - № 3. - С. 10 - 11.
3. Чернышов Г.Г. Влияние силового воздействия дуги на формирование шва/Проблемы прочности и технологии в сварке//Труды МВТУ. - 1981. - №363. - С. 92 - 101.
4. Лившиц А.С., Гринберг Н.А., Куркумелли Э.Г. Основы легирования наплавленного металла. М.: Машиностроение, 1969. — 188 с.
5. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985.-240с.
6. Каховский Н.И., Фартушный В.Г., Ющенко К.А., Электродуговая сварка сталей. Справочник. Киев. Наукова думка. 1974. 51, 60. с.
7. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Селиванов Ю.В., Никонова И.В. Влияние режимов наплавки покрытий на коррозионную стойкость в кислых средах сварных соединений аустенитных сталей//Обработка металлов. - 2007. - № 2. - С. 33 - 36.
8. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. Влияние энергетических параметров сварки на структуру и свойства сварных соединений низколегированных сталей//Сварочное производство. - 1012. - № 8. - С. 3 - 5.