

Ю.И. Усенко⁽¹⁾, доцент, к.т.н.
В.И. Иванов⁽²⁾, ст. преподаватель
В.К. Тарасов⁽²⁾, доцент, к.т.н.
В.М. Печенникова⁽²⁾, доцент
Г.Г. Евдокимов⁽³⁾, начальник отдела

О ПОДГОТОВКЕ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНОЙ ОСНОВЫ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ ПЕРЕД НАНЕСЕНИЕМ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ

⁽¹⁾Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск,

⁽²⁾Запорожская государственная инженерная академия,

⁽³⁾ОАО «Запорожский сталепрокатный завод»

Розроблено технологію активації поверхні сталеві основи біметалевого дроту марки БСА-КПЛ перед нанесенням захисної алюмінієвої оболонки з використанням електролітно-розрядного ефекту. Результати дослідно-промислових випробувань агрегату для реалізації розробленої технології показали суттєве підвищення якості очищення поверхні металу-основи від будь-яких забруднень, а також значне збільшення адгезійної міцності зчеплення компонентів дроту.

Разработана технология активации поверхности стальной основы биметаллической проволоки марки БСА-КПЛ перед нанесением защитной алюминиевой оболочки с использованием электролитно-разрядного эффекта. Результаты опытно-промышленных испытаний агрегата для реализации разработанной технологии показали существенное повышение качества очистки поверхности металла-основы от любых видов загрязнений, а также значительное увеличение адгезионной прочности сцепления компонентов проволоки.

Введение. Технологические свойства биметаллической проволоки, широко применяемой в высоковольтных линиях электропередачи, воздушных линиях связи и контактной сети электрифицированных железных дорог, в значительной степени зависят от адгезии защитной оболочки из электропроводного металла к поверхности высокопрочной стальной основы (сердечника).

Анализ достижений. На ОАО «Запорожский сталепрокатный завод» биметаллическую сталеалюминевую проволоку марки БСА-КПЛ диаметром 4,3 и 5,1 мм изготавливают методом накатки порошка алюминия марки А7 (А8) на поверхность основы из отожженной стали 40 (50), который реализуют в рабочих валках непрерывного двухклетьевого прокатного стана, с использованием электроконтактного нагрева проволоки постоянным током.

Прокатный стан оснащен разматывающим устройством для высокопрочной стальной проволоки, источником постоянного тока, бункером с алюминиевым порошком и приемной моталкой для готовой проволоки. После разматки металла-основы с катушки, установленной на разматывающем устройстве, ее в форме нити подают на первый участок прямого нагрева до необходимой температуры. При прохождении проволоки через бункер с алюминиевым порошком осуществляют первичную напрессовку порошка на поверхность металла-основы в рабочих валках черновой клетки прокатного стана. Далее осуществляют передачу обработанного сердечника на второй участок прямого нагрева и в рабочие валки чистовой клетки стана с последую-

щим удалением избыточного слоя алюминия (толщина защитной оболочки составляет 0,12...0,25 мм) и наматыванием биметаллической проволоки в бунт на барабане приемной моталки.

Одним из основных факторов, определяющих технологичность биметаллической проволоки, является адгезия алюминиевой оболочки к поверхности стальной основы. Однако образование на поверхности металла-основы интерметаллидов типа «железо-алюминий», а также наличие пленки оксидов и частиц волоочильной смазки, серьезно препятствуют надежному соединению компонентов биметаллической проволоки. В этой связи поверхность металла-основы подвергают горячему оцинкованию с предварительной обработкой путем обезжиривания, травления и флюсования. Указанные операции характеризуются наличием экологически вредных травильных и флюсовальных растворов, существенными затратами на перевозку металла-основы биметаллической проволоки в цех металлических покрытий и ее последующее горячее оцинкование со значительным расходом цинка и, что самое важное, не гарантируют требуемое качество обработки поверхности стального сердечника.

В тоже время в промышленности находят применение методы обработки металлов и сплавов, основанные на использовании концентрированных потоков электрической энергии [1]. Известны методы обработки с применением нетрадиционных источников плазмы, в которых одним из электродов служит электролит. Суть такой обработки металла заключается в использовании электролитно-разрядного эффекта, вызванного действием плазменных разрядов в виде серии мощных коротких активирующих импульсов постоянного тока, подаваемых на электрохимическую ячейку, находящуюся под повышенным напряжением, одновременно на металл оказывает электрохимическое воздействие и электролит.

Постановка задачи. Целью данного исследования является экспериментальное определение возможности применения импульсной электрохимической технологии как метода удаления различных видов загрязнений с поверхности стальной основы биметаллической проволоки перед нанесением защитной алюминиевой оболочки.

Основная часть исследований. В основу настоящих исследований положены следующие предпосылки, которые должны способствовать успешной реализации указанной технологии для очистки поверхности металла-основы биметаллической проволоки от загрязнений:

- отсутствие краевого эффекта на поверхности металла-основы;
- способность металла-основы пропускать токи большой величины при минимальной площади поверхности;
- несложность выполнения основного условия для электролитной обработки: площадь вспомогательного электрода должна быть значительно больше площади активного электрода (обрабатываемого участка поверхности металла-основы).

Комплекс экспериментов, направленных на достижение поставленной задачи, выполняли на специальном экспериментальном стенде, разработанном на кафедре ТЭМП НМетАУ [2].

На стенде, состоящем из основной ванны-накопителя, рабочей ванны, двух направляющих роликов с катушками, оснащенных индивидуальными приводами, источника постоянного тока мощностью 3 кВт и пластинчатого электрода, осуществляли перемещение стальной проволоки диаметром 0,5...3,5 мм (металлического электрода-катода) со скоростью 0,05 м/с через рабочую ванну с электролитом (жидким электродом). Величину напряжения, подводимого от источника постоянного тока, изменяли от 40 до 200 В. В процессе экспериментов исследовали кислые (H_3PO_3), ще-

лочные ($Na_2CO_3 + NOH$) и нейтральные (Na_2SO_4) электролиты различной концентрации и плотности.

Исследованиями установлено, что при достижении рабочего напряжения 60...80 В поверхность стальной проволоки обволакивается сплошным слоем пузырьков газа (водорода), которые не могут от нее оторваться. Образовавшийся пограничный слой представляет собой динамически устойчивую двухфазную систему (типа пены), в которой жидкая фаза существует в виде тонких пленок. Как следствие, площадь контакта жидкого и металлического электродов уменьшается, а плотность тока возрастает из-за увеличения проводимости электролита, вызванной нагревом его проходящим током. Выделение значительного количества теплоты сопровождается взрывообразным испарением электролитных перемычек, вызывая возникновение кавитационных явлений на поверхности металлического электрода. Его поверхность подвергается тепловому и кавитационному воздействию энергии непрерывно испаряющихся перемычек электролита, что способствует очистке от загрязнений.

Дальнейшее повышение рабочего напряжения до 100...170 В сопровождается переходом процесса в нестационарное состояние, при котором происходит периодическое возникновение и нарушение контактов между жидким и металлическим электродами. Происходит протекание импульсных электрических разрядов, аналогичных разрядам, возникающим при разрывах металлических контактов. Величина среднего сопротивления слоя электролита в области, прилегающей к поверхности металлического электрода, покрываемого сплошным слоем пара и водорода, изменяется в больших пределах из-за выделения пузырьков водорода и периодического взрывоопасного испарения электролитных перемычек. При этом его величина возрастает до значения, при котором на месте последней испарившейся перемычки протекает импульсный электрический разряд. Формирование канала разряда происходит в парогазовой среде между металлическим и жидким электродами. В зоне прохождения разряда возникают значительные электродинамические силы, что сопровождается кратковременным образованием на поверхности жидкого электрода области высоких давлений и температуры газа, способствующей образованию в пространстве вокруг металлического электрода ударной волны.

Фронт волны сжатия, которая образуется при разряде, перемещается в парогазовой среде и взаимодействует с поверхностью жидкого и поверхностью металлического электродов. При этом энергия электрических разрядов частично преобразуется в энергию кавитационных полостей, что приводит к последующему гидродинамическому удару жидкости (электролита) о поверхность металлического электрода и способствует увеличению скорости уноса загрязнений из зоны обработки. За время протекания разряда наблюдается уменьшение толщины парогазового слоя из-за конденсации, растворения и вытеснения его потоком жидкости с последующим переходом процесса в исходное состояние. Как правило, энергии совместного механического, термического и электродинамического воздействий электрических разрядов на поверхность проволоки достаточно для удаления в течение одного прохода всех видов загрязнений (ржавчины, окалины и пригоревшей смазки).

При более высоком напряжении (180...200 В) на поверхности металлического электрода наблюдается формирование сплошного (близкого к стационарному) парогазового слоя, способствующего непрерывному протеканию импульсных электрических разрядов между металлическим и жидким электродами, энергия которых позволяет осуществлять нагрев слоя до высоких температур, однако из-за кратковременности воздействия разрядов (1...2 с) нагрев поверхности металла-основы биметалличе-

ской проволоки не наблюдается.

Анализ процессов, происходящих на металлическом электроде (стальной проволоке), свидетельствует о наличии комплексного электрохимического (выделение водорода), теплового (испарение перемычек электролита), кавитационного (образование и разрушение парогазового слоя) и электроэрозионного (возникновение импульсных разрядов) воздействия на его поверхность. Действие импульсного электрического поля, плазмы разряда, ударных волн и высокоскоростных струй электролитов кавитационного типа, способных при рационально подобранном составе рабочей жидкости способствует максимальному испарению летучих веществ с поверхности металла-основы биметаллической проволоки и удалять все механические загрязнения.

Проведенные исследования позволили установить, что жировые загрязнения и ржавчина при прочих равных условиях эффективно удаляются с помощью щелочных и нейтральных электролитов, а окалина – кислыми электролитами.

Установлено, что рациональным электролитом является смесь карбоната и гидроксида натрия. Так, при использовании данной смеси в качестве жидкого электрода в интервале изменения рабочего напряжения от 140 до 170 В наблюдали не только практически полное удаление механических и жировых загрязнений от пригоревшей смазки с поверхности проволоки, но и ее существенную активацию, что важно для последующего нанесения покрытия. На основе проведенных экспериментов сформулированы требования к параметрам рабочей жидкости для реализации предлагаемой технологии при обработке поверхности стальной основы биметаллической проволоки марки БСА-КПЛ перед нанесением защитной алюминиевой оболочки (табл. 1).

Таблица 1 – Рациональные технологические параметры электролита для обработки поверхности металла-основы биметаллической проволоки

Наименование параметра, размерность	Численное значение
Концентрация карбоната натрия, %	12...16
концентрация гидроксида натрия, %	4...6
плотность раствора электролита, г/см ³ :	
- для металла-основы диаметром $\leq 3,5$ мм	1,090...1,095
- для металла-основы диаметром $> 3,5$ мм	1,10...1,15
- температура раствора, °С	60...70

Экспериментально установлено, что снижение концентрации раствора электролита ниже приведенного значения вызывает рост мощности, необходимой для достижения стабильного горения плазмы, что объясняется увеличением сопротивления электролита. Превышение концентрации раствора электролита резко увеличивает степень осаждения электролита на поверхности металла-основы биметаллической проволоки и существенно затрудняет ее последующую отмывку. Рост плотности раствора электролита выше рекомендуемых значений приводит к увеличению его электропроводности, а также переходу режима очистки поверхности металла-основы в режим ее нагрева, а снижение плотности раствора электролита сопровождается ростом мощности, при которой достигается стабильное горение плазмы. Уменьшение рабочего напряжения ниже минимально допустимого значения (160 В) вызывает снижение устойчивости процесса образования импульсных электрических разрядов, а повышение рабочего напряжения выше 190 В приводит к существенному подорожанию процесса обработки поверхности металла-основы биметаллической проволоки без заметного улучшения ее качественных характеристик. При температуре раствора

менее 60 °С имеет место свечение электрических разрядов, однако загрязнения с поверхности металла-основы не удаляются из-за уменьшения интенсивности обработки, при температуре раствора более 70 °С имеют место потери энергии на нагрев металла.

Экспериментальная проверка результатов. Для условий цеха биметаллических проводов ОАО «Запорожский сталепрокатный завод» разработана и испытана опытно-промышленная конструкция агрегата для предварительной обработки металла-основы в электролитной плазме [3]. Агрегат представляет собой конструкцию, в которой монтируют разматывающее устройство, винипластовые ячейки, заполненные смесью карбоната и гидроксида натрия заданной плотности и концентрации, стальные сварные емкости-сборники для отстаивания смеси, насосы для ее подачи из емкостей в ванны, секция струйной промывки поверхности металла-основы и система направляющих роликов. Ролики расположены между разматывающим устройством металла-основы и черновой клетью прокатного стана и служат одновременно, как фиксаторами металла-основы, так и токосъемниками.

При перемещении металла-основы через первую рабочую ванну, заполненную электролитом, вокруг его поверхности создается парогазовый слой толщиной до 1,0 мм, который обеспечивает стабильное горение плазмы, возбуждаемой при прохождении серии импульсных электрических разрядов между электролитом и обрабатываемой поверхностью. Высокая степень концентрации электрической энергии на различных участках поверхности металла-основы обеспечивает скоростное и качественное удаление всех видов загрязнений в раствор. Из раствора электролита загрязнения легко отводят вытяжкой. В переходном режиме, когда стабильная плазма не образуется, очищающими факторами служат пузырьки газа (водорода), покрывающие поверхность металла-основы, а также кавитация, возникающая при их разрушении.

Далее металл-основа поступает во вторую рабочую ванну для водоструйной промывки и удаления с его поверхности остатков электролита. Качественная активация поверхности металла-основы и двухступенчатый нагрев постоянным током в сочетании с накаткой алюминиевого порошка в рабочих валках прокатного стана позволяют обеспечить равномерность нанесения защитной алюминиевой оболочки. Полученная биметаллическая проволока характеризуется достаточной адгезионной прочностью и соответствует необходимым требованиям.

Опытно-промышленные испытания показали, что использование импульсной электрохимической технологии подготовки поверхности металла-основы биметаллической проволоки позволяет в течение одного прохода обеспечить удаление любых видов загрязнений. Данная технология характеризуется отсутствием экологически вредных операций и применением недорогого двухкомпонентного неагрессивного раствора.

Основные технические характеристики агрегата для реализации предлагаемой технологии приведены в табл. 2.

Испытаниями трех-, четырех- и пятиниточного агрегатов с питанием от одного генератора импульсов установлено незначительное влияние электрического, электромагнитного и электрохимического воздействий отдельных обрабатываемых нитей металла-основы друг на друга. При одновременной импульсной обработке трех параллельно расположенных линий металла-основы зафиксировано арифметическое суммирование токов отдельных цепей, то есть наблюдается практически одновременное протекание импульсного разряда во всех электрических контурах, что свидетельствует об отсутствии необходимости отдельных источников питания для каждого конту-

ра. В связи с этим для удобства обслуживания многониточный блочный промышленный агрегат целесообразно представить в виде системы из трех-, четырех- и пятиниточных установок, оснащенных индивидуальными источниками питания и размещенных в одном технологическом потоке, который совмещает процессы подготовки поверхности металла-основы и получения биметаллической проволоки

Таблица 2 - Техническая характеристика агрегата для электролитно-разрядной активации поверхности металла-основы биметаллической проволоки

Основные характеристики, размерность	Характеристика, численное значение
Род тока	постоянный
Полярность металла-основы	катод
Напряжение, В	140...160
Плотность тока, А/м ²	2·10 ⁴
Длительность обработки, с	≤ 9,20
Токоподвод	контактный
Скорость движения металла-основы, м/с	≤ 1,0

Агрегат для электролитно-разрядной активации поверхности металла-основы биметаллической проволоки заменяет комплекс операций по многоступенчатой подготовке его поверхности, а освободившиеся площади можно использовать для размещения дополнительного технологического оборудования.

Результаты сравнительных испытаний эксплуатационной надежности биметаллической сталеалюминовой проволоки марки БСА-КПЛ с наружным диаметром 4,3 и 5,1 мм, полученной как по традиционной технологии, так с использованием электролитно-разрядной обработки (табл. 3) свидетельствуют о существенном росте ее циклической стойкости и значительном повышении прочности сцепления защитной оболочки с поверхностью металла-основы.

Таблица 3 – Результаты испытаний биметаллической проволоки с наружным диаметром 4,3 мм (I) и 5,1 мм (II) при различной технологии изготовления

Показатель	I	II
Количество циклов знакопеременного изгиба проволоки до разрушения:	95±5 / 165±2	99±6 / 173±3
- стандартное отклонение	5,60 / 4,20	5,40 / 4,10
- коэффициент вариации, %	4,80 / 3,10	4,60 / 2,90
Количество перегибов проволоки до разрушения оболочки:	6,30±0,4 / 0,40±0,6	6,60±0,5 / 11,20±0,4
- стандартное отклонение	0,90 / 0,69	0,87 / 0,66
- коэффициент вариации, %	14,20 / 10,60	13,90 / 10,40

Примечание:

в числителе приведены значения показателя для проволоки, полученной с использованием электролитно-разрядной обработки,

в знаменателе – для проволоки, полученной по традиционной технологии

Так, после обработки поверхности металла-основы электрическими разрядами в импульсном режиме количество циклов знакопеременного изгиба биметаллической проволоки до разрушения возрастает в 1,82 раза, а количество перегибов до разрушения защитной оболочки – в 1,75 раза. При этом разрушение покрытия и металла-

основы проволоки, которую изготавливали с использованием предложенной технологии, наблюдается одновременно, тогда, как для оцинкованной проволоки сначала имеет место нарушение целостности защитной оболочки и через 3...4 перегиба – металла-основы.

Заключение. Реализация электрохимической технологии активации поверхности металла-основы биметаллической проволоки в производственных условиях ОАО «Запорожский сталепрокатный завод» позволяет:

- значительно улучшить качество подготовки поверхности металла-основы, а также повысить ее адгезию к защитной алюминиевой оболочке;
- существенно сократить трудозатраты из-за исключения операций транспортировки, обезжиривания, травления, флюсования и горячего оцинкования поверхности металла-основы в цехе металлических покрытий;
- значительно повысить качество готовой продукции;
- улучшить условия труда обслуживающего персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электролитно-кавитационная и электролитно-плазменная обработка проката в непрерывных агрегатах / В. И. Дунаевский, А. Я. Занин, П. М. Коваленко [и др.] // Машины для обработки полосового металла: сб. научн. тр. – М.: ВНИИМетмаш, 1979. – № 6. – С. 81-88.
2. Моделирование процесса импульсной электрохимической подготовки поверхности металла перед покрытием / Ю. И. Усенко, Ю. В. Михеев, В. С. Рой [и др.] // Всесоюз. совещ. «Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии», (14-19 окт. 1991 г., Новокузнецк): тезисы докл. – Новокузнецк: Наука, 1991. – С. 251-252.
3. Импульсно-плазменная электрохимическая технология активации поверхности стальной основы биметаллической проволоки / Ю. И. Усенко, В. И. Иванов, В. А. Скачков [и др.] // Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра: материалы межд. научн.-техн. конф., (8-9 окт. 2002 г., Киев). – Киев: НТТУ «КПИ», 2002. – С. 113-116.

Стаття надійшла до редакції 20.12.2009 р.
Рецензент, проф. А.Я. Жук