

УДК 621.357:621.791.042

ЭЛЕКТРОХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПРОВОЛОК ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ И НАПЛАВКИ*

М.В. СЕМЕНЧЕНКО, В.Л. КРАСИКОВ, В.Г. ДАШКЕВИЧ

Отмечена актуальность и исследованы процессы электрохимико-термоциклической обработки проволоки для защитных покрытий. Определены оптимальные режимы получения сплавов на основе проволоки Св-08 и проволоки из стали 70. Оценена стоимость и определена область рационального использования разработанных сплавов. Разработан технологический процесс восстановления быстроизнашивающихся деталей с использованием в качестве наплавочного сплава диффузионно-легированной проволоки.

Введение. Исследование и разработка специальных сплавов для напыления и наплавки имеет большую историю [1 – 4]. Накопленный к настоящему времени достаточно большой опыт исследования и производства специальных сплавов позволяет предложить для конкретных условий эксплуатации рациональный состав сплава и способа его нанесения на поверхности детали [5]. Видимо, разработка принципиально новых составов наплавочных сплавов в ближайшее время малоэффективна. Учитывая современные экономические реалии, по нашему мнению, следует снижать стоимость известных, ранее разработанных наплавочных сплавов за счет разработки новых способов их получения. Разработанные принципы диффузионного легирования наплавочных порошков открывают широкие перспективы синтеза экономно легированных сплавов заданного состава [6]. Переход от диффузионного легирования полидисперсных порошковых систем к легированию стальной проволоки имеет ряд технологических преимуществ, обусловленных спецификой объекта. Это, в первую очередь, – повышение равномерности обработки и простота последующего нанесения покрытия. Однако существуют определенные сложности, требующие исследований. Во-первых, диффузионное легирование проволоки в традиционных порошковых насыщающих смесях трудоемко и энергозатратно. Предварительные расчеты свидетельствуют, что стоимость такой проволоки становится сопоставимой с традиционными наплавочными проволоками. Поэтому для получения конкурентоспособной наплавочной диффузионно-легированной проволоки необходимо радикально ускорять процесс диффузионного легирования. Во-вторых, карбидные, боридные, и другие высокотвердые диффузионные слои охрупчивают проволоку, в ряде случаев делая невозможным ее традиционную подачу. Поэтому необходимы исследования пластичности, а возможно, и разработка специальных подающих механизмов. В-третьих, создание экономно легированного наплавочного сплава предполагает широкое применение термической обработки и, соответственно, изучение закаляемости и прокаливаемости наплавочных слоев

Оборудование, материалы, методики для проведения исследований. Анализ различных стадий химико-термической обработки (ХТО) деталей, в том числе проволочных, а также литературных данных свидетельствует о перспективности непосредственного электронагрева пропусканием электрического тока с дополнительным термоциклированием [7, 8]. В этом случае происходит радикальное ускорение диффузионных процессов в металле, что существенно ускоряет процесс ХТО. Для реализации электрохимико-термоциклирующей обработки (ЭХТЦО) была разработана и изготовлена специальная установка (рис. 1) [9].

Установка работает следующим образом: от трансформатора 1 рабочее напряжение подается на электроконтактные пластины 2, через которые осуществляется нагрев обрабатываемой проволоки 3. Термоциклическая обработка (ТЦО) обеспечивается формирователем управляющих импульсов 4 (задает амплитуду, продолжительность импульса, паузу между импульсами), соединенным с регулятором 5 и источником питания 6. Мгновенная температура при диффузионном отжиге проволоки фиксируется с помощью оптического пирометра 7. Установка позволяет проводить диффузионное насыщение проволоки в стеклянной трубке 8 длиной АВ.

Для проведения исследований были выбраны проволоки Св-08 ГОСТ 2246-70 и из стали 70 ГОСТ 9389-75. Этот выбор позволяет:

- получить сплавы и покрытия из них с разнообразным спектром структурных классов, легируя их широкой номенклатурой элементов;
- исследовать влияние легирующих элементов на свойства проволоки, покрытий;
- значительно уменьшить стоимость материалов и покрытий, по сравнению с известными аналогами;
- создать наплавочную проволоку с широким комплексом свойств.

* Работа выполнена под руководством канд. техн. наук, доц. В.М. Константинова

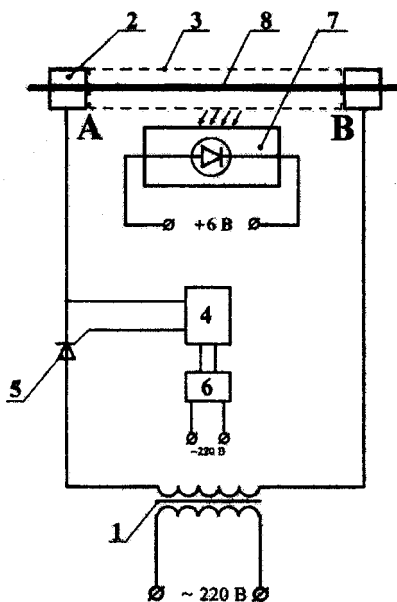


Рис. 1. Схема лабораторной установки для термической обработки проволоки

Наплавка диффузионно-легированной проволоки производилась на установке электродуговой наплавки (наплавочная головка ОКС 6569М, установка полуавтоматической наплавки в среде CO_2 – ПДГ 508). Металлографические, микродюрметрические, дюрметрические исследования наплавленных слоев проводили согласно стандартным методикам (ГОСТ 9450-76, ГОСТ 9013-78).

Для определения прокаливаемости наплавленных слоев был модернизирован метод торцевой закалки по ГОСТ 5657-69. Прокаливаемость определяли измерением твердости поверхностного слоя наплавленных слоев. Исследование пластичности проволоки проводили при помощи специального приспособления. При этом принималось, что проволока тем пластичнее, чем большее количество перегибов она может выдержать.

Результаты исследований и их обсуждение. Принципиально возможны два пути ЭХТЦО:

- 1) термоциклический отжиг, полученный обычной ХТО диффузионных слоев;
- 2) прямое формирование диффузионных слоев при ЭХТЦО.

На первом этапе исследований изучали влияние термоциклирующего нагрева на трансформацию диффузионных слоев. Были проведены исследования влияния жесткости режима обработки. Под жестким режимом в данном случае понимается режим, при котором максимальная температура нагрева проволоки составляет $1200\text{ }^\circ\text{C}$, а минимальная – ниже $500\text{ }^\circ\text{C}$, т.е. разность между максимальной и минимальной температурами нагрева превышает $700\text{ }^\circ\text{C}$. Под мягким режимом подразумевается режим с максимальной температурой нагрева $985\text{ }^\circ\text{C}$, минимальной $\approx 800\text{ }^\circ\text{C}$, т.е. разность между максимальной и минимальной температурами обработки около $200\text{ }^\circ\text{C}$.

При отжиге борированной проволоки наиболее интенсивное оплавление диффузионного слоя наблюдается при более длительном импульсе и наименьшей продолжительности паузы (рис. 2), что, по всей видимости, связано с более значительными тепловложениями, так как в данном случае проволока более длительное время находится при более высокой температуре. При этом независимо от режима ТЦО плавление начинается на границе «диффузионный слой – основа», что обусловлено более низкой температурой плавления этой области и эффектом контактного эвтектического плавления в системе $\text{Fe}_2\text{B} - \text{Fe}$ (С, В). Предпочтительным является мягкий режим отжига, так как в этом случае пластичность проволоки выше, чем после жесткого режима отжига, и на поверхности отсутствует оплавление, характерное для проволоки, обработанной в интервале «ликвидус – солидус».

Следующим этапом исследований стало изучение диффузионных слоев на стальной проволоке, полученных непосредственно в процессе ЭХТЦО. Были выполнены исследования диффузионного легирования проволоки алюминием, хромом и титаном. Насыщение проводили в обзаках и порошковой среде, помещенной в кварцевую трубку.

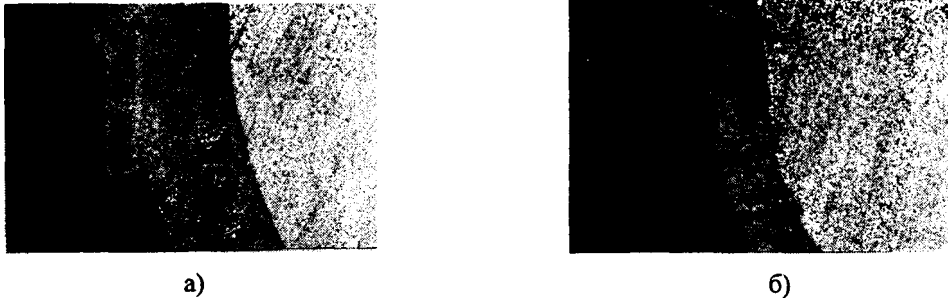
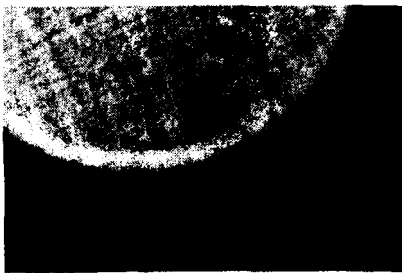


Рис. 2. Микроструктура отожженных борированных слоев при длительности импульса 2 с и силе тока 300 А, $\times 200$: а – длительность паузы 1 с; б – длительность паузы 2 с

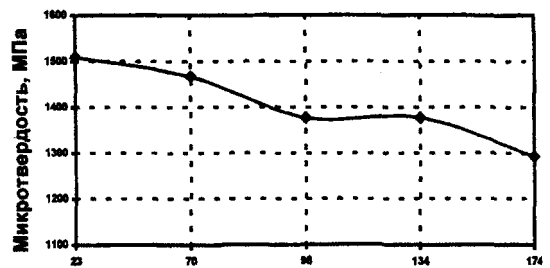
Алитирование. Нами были проведены исследования возможности реализации непосредственного диффузионного насыщения проволоки Св-08 алюминием из порошковой смеси на разработанной и изготовленной лабораторной установке для термической обработки проволоки.

Алитирование осуществлялось в кварцевой трубке диаметром 1 см. За длину рабочего участка в данном случае принималась длина участка проволоки, находящегося в непосредственном контакте с насыщающей смесью. Под длительностью цикла понималась сумма длительности импульса и длительности паузы. Обработка велась при силе тока 300 А и рабочем напряжении 16 В.

Проведенные металлографические исследования алитированной проволоки показали, что режимы с длительностью импульса 2 с и длительностью паузы от 1 до 3 с, длительностью импульса и паузы по 1 с не обеспечивают формирование сплошного диффузионного слоя на поверхности проволоки, что, вероятно, связано с недостаточным временем диффузионного насыщения. Максимальная толщина слоя в этом случае составила 14 – 15 мкм. Режимы алитирования с длительностью импульса 1 с и длительностью паузы 2 – 3 с обеспечивают формирование сплошного диффузионного слоя на насыщаемой поверхности, однако его толщина в продольном и поперечном сечениях не одинакова. Это, по-видимому, связано с «проседанием» порошка в процессе обработки под действием силы тяжести. При этом следует отметить, что в процессе обработки проволока испытывает периодически повторяющиеся периоды увеличения – уменьшения рабочей длины, вызванные соответственно наличием или отсутствием импульса тока. Так как расстояние между электроконтактными пластинами в процессе обработки постоянно, то под действием импульса проволока изгибается, а во время паузы стремится вернуться в исходное положение, что способствует перемешиванию насыщающей смеси в процессе обработки. Следовательно, во время каждого импульса к насыщаемой поверхности подается новая порция насыщающей смеси. При этом (в отличие от традиционных способов) в процессе насыщения поперечные размеры проволоки не меняются, качество поверхности практически не отличается от исходного. Это, вероятно, обусловлено тем, что при внутреннем источнике нагрева формирование диффузионного слоя происходит в результате непосредственной диффузии активного элемента из газовой фазы в насыщаемый металл с первоначальным образованием твердого раствора алюминия в основе ($V_a \ll V_d$). Средняя толщина алитированного слоя в анализируемых условиях изменяется от $33,4 \pm 4,92$ мкм до $47 \pm 4,83$ мкм, микротвердость составляет 2000 МПа (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Микроструктура алитированной проволоки, $\times 50$ (а) и изменение микротвердости сердцевинки в поперечном сечении алитированного образца (б)

Хромирование и титанирование. Эксперименты по легированию хромом и титаном из образцов оказались неудачными – если на проволоку и удавалось нанести равномерный слой обмазки (порошок + связующее), то при обработке слой отшелушивался, порошок окислялся и стабильного покрытия не получалось. Легирование в порошках без контейнера из-за окисления порошка также результатов не дало. Насыщение проводилось в порошках в контейнере, как и в случае алитирования. Получение диффузионных слоев на проволоке осуществлялось на разработанной лабораторной установке. На процесс насыщения воздействовали следующими факторами: силой тока, длительностью ее действия – циклом, который включал в себя длительность импульса и длительность паузы.

Установлено, что увеличение силы тока требует уменьшения длительности импульса и паузы (для предотвращения перегорания проволоки), поэтому для увеличения производительности или уменьшения времени обработки исследования проводились при максимально возможной на лабораторной установке силе тока. Изучена кинетика образования диффузионного слоя (рис. 4). Длительность обработки составляет приблизительно 180 с: в первые 60 с происходит преимущественно разогрев проволоки и смеси, в следующий момент происходят преимущественно диффузионные процессы, затем проволока перегорает. Обработка длительностью 180 с соответствует максимальной глубине покрытия и качеству проволоки (рис. 5).

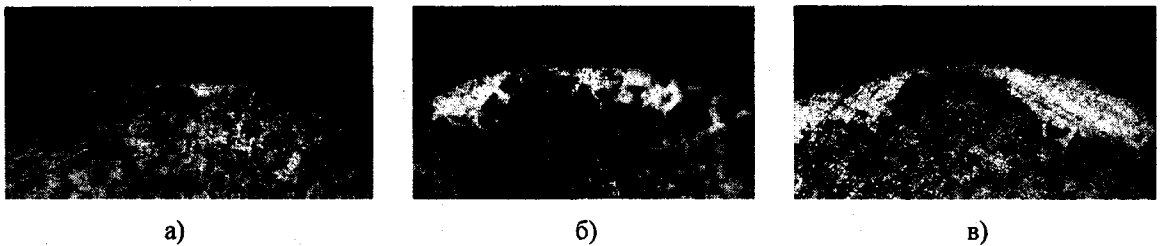


Рис. 4. Микроструктуры обработанных проволок, $\times 200$ (хромирование проволоки из стали 70; 1 с импульса и паузы):
а – 90 с; б – 120 с; в – 150 с

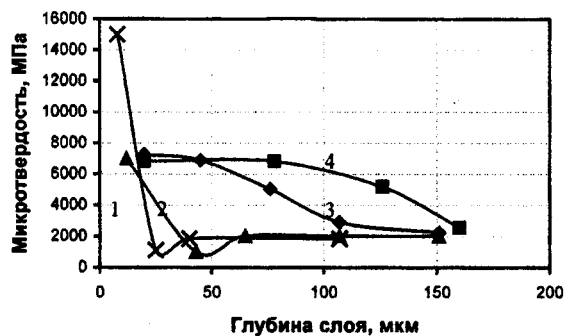
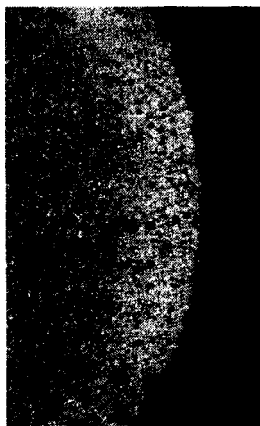


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине диффузионного слоя на стальной проволоке:
а – Св-08 – хромирование; б – титанирование; 1 – Св-08 (ХТО в печи, 1100 °С, 5 ч);
2 – сталь 70 (ХТО в печи, 1100 °С, 5 ч); 3 – Св-08 (ЭХТЦО, 180 с); 4 – сталь 70 (ЭХТЦО, 180 с)

Микротвердость слоя, полученного методом ЭХТЦО, ниже, чем слоя, полученного при традиционной ХТО в печи (см. рис. 5). Это обусловлено тем, что при скоростном электроннагреве образование карбидов не происходит [8]. Если судить по микротвердости, образуется α -твердый раствор Ti в Fe с включениями FeTi. При ХТО в печи, как правило, образуются карбиды. Данный факт благоприятно сказывается на пластичности проволоки, однако этого недостаточно для полноценного применения наплавочной проволоки в ремонтном производстве. Для этого необходимы специальные наплавочные головки и бухты для проволоки большого радиуса. Наилучшим применением для полученного сплава могут стать наплавочные электроды и прутки.

Наличие уменьшения микротвердости в подслое образцов 1 и 2 (см. рис. 5) можно объяснить диффузией углерода к поверхности для образования карбидов легирующих элементов [10]. В результате поверхность проволоки содержит железо, легирующий элемент, углерод, а чуть дальше к центру находится обезуглероженная зона.

Результаты исследования ЭХТЦО стальной проволоки свидетельствуют о 100-кратном повышении скорости формирования диффузионного слоя, содержащего хром или титан, по сравнению с традиционной печной ХТО. Так, для получения хромированного карбидного слоя толщиной 110 мкм на стали У6 при обычном ХТО требуется 6 ч при температуре 1000 °С [10], при ЭХТЦО – для получения карбидного слоя толщиной 110 мкм необходимо 180 с при токе 220 А, длительности импульса – 1 с, паузы – 2 с. Необходимо отметить, что существуют определенные трудности проведения традиционного ХТО материалов при высоких температурах в печи, которые успешно преодолеваются с использованием ЭХТЦО.

Покрытие из диффузионно-легированных проволок получали электродуговым напылением и наплавкой. Установлено, что введение в поверхностный слой проволоки для защитных покрытий определенных легирующих элементов, например бора, обеспечивает формирование гетерогенного износостойкого слоя при последующем напылении проволоки, а также способствует защите напыленных слоев от окисления и повышению прочности сцепления [11].

Наплавленные слои из диффузионно-легированной хромом и титаном проволоки имеют гетерогенное строение с большим количеством мелкодисперсных карбидов (рис. 6).



Рис. 6. Микроструктуры наплавленных слоев, $\times 200$:

а – титанированной проволокой из стали 70; б) – хромированной проволокой из стали 70

Эксперименты показали, что твердость и износостойкость наплавленных слоев из титанированной проволоки ниже хромированной. Причем микротвердость карбидов титана выше. Возможно, что при наплавке титанированной проволокой, титан интенсивно выгорает.

Как правило, наплавленные слои без термообработки имеют невысокую твердость (27 – 31 HRC), поэтому представляет интерес изучения поведения сплавов при термообработке восстановленных деталей. Прокаливаемость хромированного сплава выше титанированного. На основании результатов по прокаливаемости можно дать рекомендации по практическому использованию сплавов: хромированный сплав для полной прокаливаемости следует использовать при износах деталей не выше 15 – 16 мм, титанированный – не выше 8 – 9 мм.

По результатам проведенных исследований разработана технология получения материала и его наплавки на детали гусеницы трактора Т-130 (палец, втулку, звено). Твердость наплавленного слоя хромированной проволокой из стали 70 при закалке с низким отпускком (49 – 53 HRC). Ориентировочный ресурс восстановленных деталей (пальца, втулки) – 5500 ч.

Выводы

1. Электрохимико-термоциклическая обработка в разработанной установке позволяет интенсифицировать процесс диффузионного насыщения, значительно сокращая общее время обработки проволоки по сравнению с традиционной ХТО в печи, делая диффузионно-легированную проволоку альтернативой традиционному легирующим материалам (цена сплава в 1,5 – 4 раз меньше стоимости аналогичных наплавочных материалов). Стоимость хромированной проволоки составит приблизительно 1850 руб./кг (цены приведены на 1.06.2003 г.).

2. Существенными отличиями электрохимико-термоциклической обработки стальной проволоки является формирование диффузионного слоя с низколегированными фазами преимущественно твердорастворного типа с малым количеством карбидов, а также радикальное (на порядок) увеличение интенсивности насыщения. Толщина диффузионного слоя при этом достигает 80 – 100 мкм. Качество поверхностного слоя при этом не ухудшается.

3. Подтверждена перспективность применения разрабатываемых диффузионно-легированных наплавочных проволок в восстановительно-упрочняющих технологиях. Укрупненный технико-экономический расчет показателей подтвердил эффективность применения технологии восстановления пары «палец – втулка» гусеницы трактора Т-130 наплавкой диффузионно-легированной проволокой. Стоимость восстановленной пары «палец – втулка» составляет 40 – 50 % от стоимости новой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фрумин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка. – Харьков: Metallurgizdat, 1961. – 421 с.
2. Лившиц Л.С., Гринберг Н.А., Куркумелли Э.Г. Основы легирования наплавленного металла. – М.: Машиностроение, 1969. – 188 с.
3. Индукционная наплавка твердых сплавов / В.Н. Ткачев, Б.М. Фиштейн, Н.В. Казинцев, Д.А. Алдырев. – М.: Машиностроение, 1970. – 182 с.
4. Износостойкость и структура твердых наплавов / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев, Е.С. Беркович и др. – М.: Машиностроение, 1971. – 95 с.
5. Наплавочные порошковые ленты и проволоки: Справочник / П.В. Гладкий, И.А. Кондратьев, В.И. Юматова, А.П. Жудра. – Киев: Тэхника, 1991. – 36 с.
6. Ворошнин Л.Г., Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. – Мн.: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 1999. – 133 с.
7. Ворошнин Л.Г., Константинов В.М. Актуальные проблемы химико-термической обработки // Вестник БНТУ. – 2002. – № 4. – С. 22 – 26.
8. Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов / И.Н. Кидин, В.И. Андрущечкин, В.А. Волков, А.С. Хомин. – М.: Металлургия, 1978. – 320 с.
9. Патент на полезную модель № 696 МПК 7 С21D 1/40. Установка для электротермической обработки проволоки / В.М. Константинов, А.С. Губанов, С.Н. Абраменко, М.В. Семенченко; Заявл. 5.03.02.
10. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / Г.В. Борисенко, Л.А. Васильев, Л.Г. Ворошнин и др. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
11. Губанов А.С. Диффузионно-легированная проволока для газотермического напыления // Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин: Тематический сб. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – С. 68 – 71.