

## ЭЛЕКТРОХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КАК СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКОНОМНО-ЛЕГИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ

**Введение.** Нанесение защитных покрытий, где в качестве наплавочного материала выступает проволока, является весьма актуальным для Республики Беларусь при восстановлении изношенных поверхностей деталей машин и механизмов либо упрочнении новых. Химический состав наносимого материала напрямую зависит от требуемого комплекса эксплуатационных свойств детали. В настоящее время на рынке республики представлен широкий диапазон легированной проволоки разнообразного химического состава. Однако данная проволока отличается повышенной стоимостью из-за, в ряде случаев, неоправданно высокой концентрации легирующих элементов, что делает ее применение экономически не выгодным в случае обработки дешевых быстроизнашиваемых деталей. Поэтому весьма актуальной является задача экономного легирования проволоки.

Диффузионное насыщение проволоки в традиционных порошковых насыщающих смесях в печах трудоемко и энергозатратно – время диффузионного насыщения составляет 1-10 часов. Формируемый диффузионный слой хрупок, скалывается при нанесении защитного покрытия, уменьшая тем самым концентрацию легирующего элемента в наносимом покрытии. Для устранения этого негативного явления требуется дополнительная операция – диффузионный отжиг, что еще значительно увеличивает общее время обработки. Поэтому представляется актуальным интенсификация процесса диффузионного насыщения проволоки, которая позволит не только сократить общее время обработки, но и устранить вышеперечисленные недостатки.

Существуют различные способы интенсификации диффузионного насыщения [1, 2], анализ которых применительно к проволоке показал, что для проволоки наиболее технологичными будут следующие способы:

- облучение концентрированными потоками энергии;
- индукционный нагрев;
- электроконтактный нагрев (нагрев, осуществляемый путем непосредственного пропускания тока через изделие);
- повышение температуры процесса (возможно до интервала ликвидус-солидус);
- термоциклирование;
- изменение размера частиц насыщающей среды;
- повышение дефектности поверхностного слоя детали упругой, пластической, циклической деформацией;
- подбор типа активатора и восстановителя;
- изменение состава насыщающей среды (в том числе реализация эффекта жидкометаллической фазы в насыщающей порошковой среде);
- изменение фазового, химического состава основы (в том числе реализация эффекта жидкометаллической фазы в поверхностном слое).

Проведенный анализ возможных способов интенсификации свидетельствует об эффективности применения диффузионного насыщения проволоки в процессе электрохимико-термической обработки, осуществляемой путем электроконтактного нагрева. Преимущество указанного способа заключается в том, что электроконтактный нагрев позволяет вести непрерывную обработку проволоки, не требует столь значительных затрат на оборудование, обеспечивает достижение значительных температур (1100°C - 1200°C и выше) за незначительный промежуток времени (1-2 секунды) [3]. При этом проволока может быть легирована различными химическими элементами.

Кроме соответствия по химическому составу проволока для защитных покрытий должна обладать удовлетворительной пластичностью в сочетании с достаточной прочностью. Улучшить структуру проволоки и, как следствие, повысить уровень ее свойств термической обработкой при температурах ниже температуры гомогенизации можно термоциклированием – периодически повторяющимся нагревом и охлаждением по режимам, учитывающим внутреннее строение материала. Термоциклирование при совмещении с химико-термической обработкой во многом устраняет основные недостатки традиционной химико-термической обработки, а также способствует интенсификации процесса диффузионного насыщения. Технологические процессы термоциклирования состоят из операций многократных нагревов и охлаждений, режимы которых имеют два характерных отличия от традиционного метода термической обработки:

- отсутствие выдержки при постоянной температуре нагрева;
- осуществление многократных нагревов и охлаждений с оптимальными скоростями.

В зависимости от температуры процесса можно выделить низко-, средне- и высокотемпературное термоциклирование; в зависимости от условий нагрева и охлаждения маятниковое термоциклирование и термоциклирование с промежуточными охлаждениями до комнатной температуры [4]. Изучение кинетики роста диффузионных слоев показало, что использование маятниковой схемы термоциклирования при борировании приводит не только к сокращению длительности термической обработки, но и к увеличению толщины борированного слоя на 20-25% [5]. Схема температурно-временной зависимости процесса диффузионного насыщения, совмещенного с термоциклированием, осуществляемом по маятниковой схеме, представлена на рисунке 1. Данная схема термоциклирования отличается отсутствием изотермической выдержки, как при максимальной, так и при минимальной температуре нагрева.

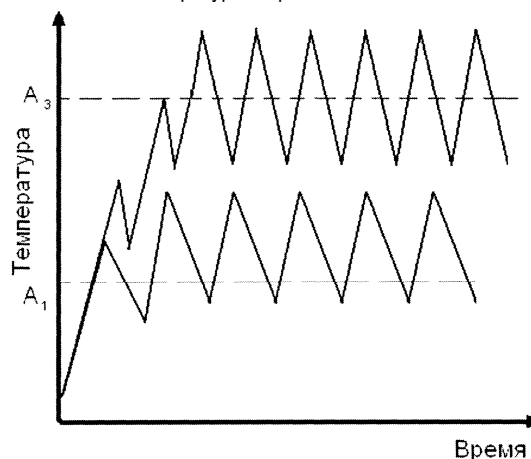


Рис. 1. Схема температурно-временной зависимости при термоциклировании, осуществляемом по маятниковой схеме

**Способ и установка для химико-термической обработки проволоки.** На основании всего вышеперечисленного, нами предложен способ диффузионного насыщения проволоки [6], основанный на совмещении электроконтактного нагрева и термоциклирования, осуществляемого по маятниковой схеме, который может быть ре-

**Константинов Валерий Михайлович**, к.т.н., доцент, зав. кафедрой материаловедения Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

**Семенченко Марина Владимировна**, ст. преподаватель кафедры технологии конструкционных материалов Полоцкого государственного университета.

Беларусь, ПГУ, 211440, Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.

лизован для насыщения проволоки как карбидообразующими элементами, так и некарбидообразующими элементами. Предложенный способ позволяет получить относительно не дорогую проволоку по сравнению с легированной проволокой и за значительно меньший период времени по сравнению с традиционным насыщением в печи.

Для реализации указанного способа нами была разработана [7], собрана и опробована лабораторная установка для электрохимико-термической обработки проволоки (рис. 2). Нагрев проволоки осуществляется путем непосредственного пропускания тока через изделие. Формирователь управляющих импульсов (задает амплитуду силы тока, продолжительность импульса и за длительность паузы между импульсами) обеспечивает реализацию термоциклирования по маятниковой схеме. Длина зоны диффузионного насыщения может изменяться в зависимости от требуемого общего времени обработки и количества тепла, необходимого для реализации процесса диффузионного насыщения.

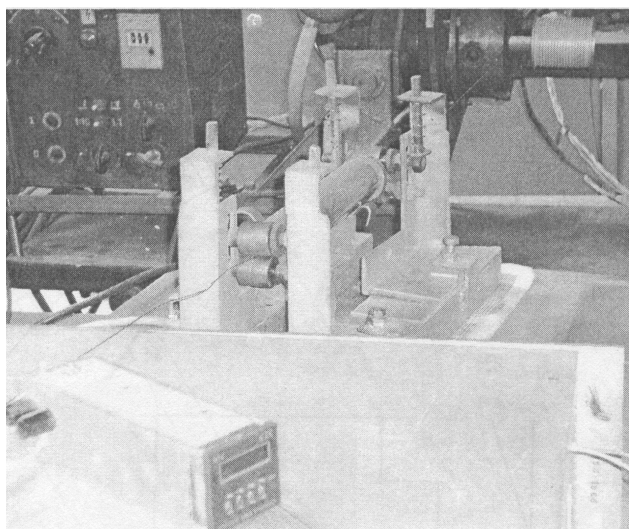


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки для электрохимико-термической обработки проволоки

При проектировании установки для электрохимико-термической обработки рассматривалась возможность реализации непрерывной и ступенчатой подачи проволоки в зону диффузионного насыщения.

При ступенчатой подаче проволока в процессе диффузионного насыщения неподвижна. Подача осуществляется через заданный отрезок времени на длину обработки (нагрева). В этом случае проволока прогревается неравномерно. Температура области, пролегающей к токоподводящим контактам, ниже температуры других областей. Это обусловлено тем, что в данном случае теплоотвод осуществляется не только в окружающее пространство, но непосредственно к токоподводящим роликам. Металлографические исследования показали, что на обрабатываемом отрезке проволоки существуют участки, на которых формирование диффузионного слоя не происходит из-за недостаточного тепловложения. Кроме того, при некоторых режимах термоциклирования проволока перегорает через несколько секунд после начала обработки из-за значительного разогрева отдельных участков проволоки.

При непрерывной подаче нагреву подвергается одновременно множество микрообъемов металла проволоки, нагретых до различных температур - от микрообъема, только поступающего в зону диффузионного насыщения, до микрообъема, покидающего указанную зону. Поэтому можно считать, что все микрообъемы проволоки прогреваются одинаково по всей длине обработки, проходя непрерывно все стадии возможного теплоотвода. Это способствует равномерному тепловложению по всей длине обработки и, как следствие, формированию диффузионного слоя по всей длине проволоки. Поэтому обработка проволоки на разработанной нами установке осуществляется при непрерывной подаче проволоки в зону диффузионного насыщения с заданной постоянной скоростью.

Нами исследовалась возможность насыщения проволоки СВ08Г2С ГОСТ 2246-80 диаметром 1,2 мм бором и титаном [8-9]. Введение бора в стальную проволоку диффузионным путем способствует значительно повышению твердости наносимого в последующем покрытия, как следствие, борсодержащие покрытия имеют высокую износостойкость. Введение титана в стальную проволоку позволяет повысить коррозионную стойкость наносимого покрытия, главным образом, в различных кислотах.

Для реализации термоциклирования по маятниковой схеме электрический ток пропускали через проволоку с длительностью импульса 1-10 секунд и длительностью паузы 1 - 3 секунд. Свойства полученной диффузионно-легированной проволоки исследовали по известным методикам. Приготовление шлифов производили согласно ГОСТ 9.302-88. Измерение микротвердости проводили по ГОСТ 9450-76 на приборе ПМТ-3. Измерение толщины диффузионного слоя осуществляли с помощью микроскопа прибора ПМТ-3.

**Результаты исследований.** Проведенные металлографические исследования проволоки, подвергнутой диффузионному насыщению бором, показали, что на поверхности проволоки формирование химического соединения (FeB и FeBr) не происходит. Микротвердость диффузионного слоя на расстоянии 10 мкм от поверхности достигает 4000 МПа, а в ряде случаев только 3000 МПа. Это соответствует микротвердости твердого раствора бора в  $\alpha$ -железе. Микротвердость по сечению проволоки уменьшается постепенно. Микротвердость сердцевины составляет порядка 1150 - 1300 МПа. Это, вероятно, обусловлено применением внутреннего источника нагрева, при котором температура проволоки выше температуры окружающей среды, а скорость диффузии легирующего элемента в ненасыщенную основу значительно превосходит скорость его осаждения на поверхность проволоки. Это способствует тому, что экономно-легированная проволока, полученная предложенным способом, отличается более высоким качеством поверхности по сравнению с традиционным диффузионным насыщением в печи и более низким градиентом концентрации легирующего элемента по поперечному сечению.

Следует отметить, что при определенных режимах диффузионного насыщения не наблюдается характерной игольчатости борированного слоя (рис. 3). Это можно объяснить значительным разогревом поверхности (до формирования жидкой фазы) при котором насыщающий порошок, попав на поверхность проволоки, расплавляется в основном металле. Таким образом, реализуется также такой способ интенсификации процесса диффузионного насыщения, как повышение температуры процесса (возможно до интервала ликвидус-солидус).

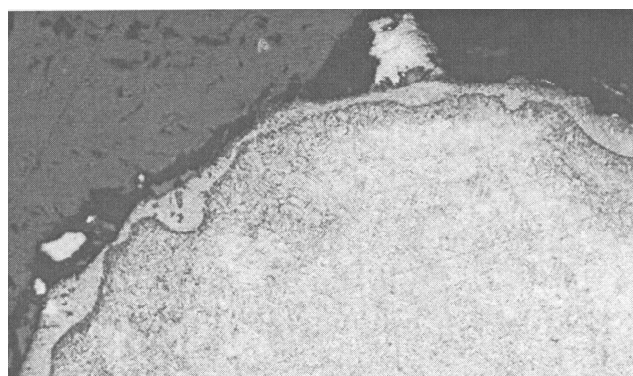


Рис. 3. Микроструктура борированной проволоки,  $\times 100$

Было проведено диффузионное насыщение проволоки титаном. Проведенные металлографические исследования показали, что происходит формирование сплошного слоя (рис. 4). Значение микротвердости диффузионного слоя в продольном направлении проволоки изменяется незначительно, в поперечном направлении плавно снижается от 3500-4200 МПа на поверхности образца до 1200-1500 МПа на видимой границе раздела слой-сердцевина. Полученная проволока также отличается высоким качеством поверхности.

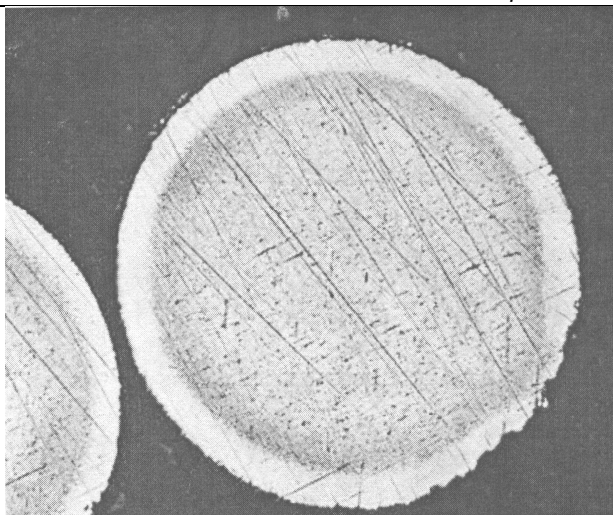


Рис. 4. Микроструктура титанированной проволоки,  $\times 50$

Высокое качество поверхности проволоки, обусловленное применением внутреннего источника нагрева, позволяет применять ее в качестве наносимого материала, как при наплавке, так и при напылении защитного покрытия. Еще одним перспективным направлением является модифицирование расплавов. Наиболее удобным и технически легко осуществимым способом модифицирования является ввод в расплав тонкоизмельченных модифицирующих присадок, помещенных в металлических трубках (полый проволоки).

Однако такая проволока отличается повышенной стоимостью, и ее применение требует предварительных экономических расчетов. Экономно-легированная проволока подается в металл с регулируемой скоростью, обеспечивая высокую степень усвоения модификатора, не повышая столь значительно стоимость самого процесса модифицирования.

**Заключение.** Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- электрохимико-термическая обработка, реализуемая путем совмещения электроконтактного нагрева и термоциклирования, осуществляемого по маятниковой схеме - наиболее эффективный способ интенсификации процесса диффузионного насыщения проволоки.
- электрохимико-термическая обработка позволяет получить относительно недорогую проволоку по сравнению с легированной проволокой и за значительно меньший период времени по сравнению с традиционным насыщением в печи.
- наиболее предпочтительной является непрерывная подача проволоки в зону диффузионного насыщения. В этом случае про-

лока прогревается равномерно по всей длине, что способствует формированию более равномерного диффузионного слоя;

- полученная экономно-легированная проволока отличается высоким качеством поверхности, низким градиентом концентрации легирующего элемента поперечному сечению, повышенной пластичностью.
- область применения получаемой экономно-легированной проволоки является нанесение защитных покрытий и модифицирование расплавов. Конечно, область применения проволоки этим не ограничивается и может быть значительно расширена.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пантелеенко, Ф.И. О классификации способов интенсификации процессов химико-термической обработки металлов и сплавов. / Ф.И. Пантелеенко, Л.С. Ляхович, Б.С. Кухарев // *Металлургия*, 1980 - Вып. 14. - С. 5-6.
2. Ворошнин, Л.Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М.Константинов. - Минск: ФТИ Новополоцк: ПГУ, 1999. - 133 с.
3. Мешков, Ю.Я. Скоростная электротермическая обработка проволоки / Ю.Я.Мешков, Н.Ф.Черненко // *МитОМ*, 1977. - №8. - С. 36-38.
4. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов / Под ред. М.Х.Шорошова. - М.: Наука, 1984. - 187 с.
5. Федюкин, В.К., Смагоринский, М.Е. Термоциклическая обработка металла и деталей машин / В.К.Федюкин, М.Е. Смагоринский. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1989. - 255 с.
6. Способ диффузионного насыщения стальных образцов, преимущественно проволоки: С23С8 00 / В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич, А.С. Губанов; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» -№ а 20080742 от 05.06.2008.
7. Установка для электротермической обработки проволоки: Патент на полезную модель № 696 МПК 7 С21D 1/40 - В.М. Константинов, А.С. Губанов, С.Н. Абраменко, М.В. Семенченко; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» № и 20020065; заявл. 05.03.02., Опубл. 30.12.02.
8. Константинов, В.М. Электрохимико-термическое насыщение стальной проволоки для защитных покрытий В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич, А.С. Губанов // *Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию ФТИ.* - Мн., 2006 - С. 428-434.
9. Семенченко, М.В. Электрохимико-термическая проволока для наплавки как перспективный способ получения диффузионно-легированной проволоки для защитных покрытий. М.В. Семенченко // *Сборник научных трудов VI международной научно-технической конференции «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин» - Новополоцк, 2007.* - Т. 1. - С. 132-134.

*Материал поступил в редакцию 15.10.08*

KONSTANTINOV V.M., SEMENCHENKO M.V. Electrical chemical-thermal processing as the way of reception is economical-alloyed of a wire

The way of reception steel economically-alloyed of wire and installation for his realization is offered. The way is based on overlapping of electrocontact heating and thermalcycle's, carried out on pendulum's the circuit. The distinctive features of the received economically-alloyed wire are shown. The area of application is designated: drawing of sheetings, modifying the fused metal.

УДК 620.197.5

**Голуб В.М., Голуб М.В., Добрияник Ю.А.**

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ КАРБИДОВ ВОЛЬФРАМА С МЕДЬСОДЕРЖАЩЕЙ МАТРИЦЕЙ

**Введение.** Работа торцовых уплотнений валов гидромашин характеризуется режимом трения основного его элемента – пары трения в виде двух контактных колец, смазка которой осуществляется

перекачиваемой средой, часто не отвечающей условиям работы узлов трения.

В перекачиваемой по магистральным трубопроводам нефти ча-

*Голуб Владимир Михайлович, к.т.н., доцент кафедры машиноведения Брестского государственного технического университета.*

*Голуб Михаил Владимирович, д.т.н., профессор кафедры машиноведения Брестского государственного технического университета.*

*Добрияник Юрий Алексеевич, преподаватель-стажер кафедры машиноведения Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224023, г. Брест, ул. Московская, 267.*