

УДК 621.785.545

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДИФФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ПУТЕМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА В РЕЖИМЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ**М.В. СЕМЕНЧЕНКО***(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается перспективность создания проволочного материала определенного химического состава для формирования защитных покрытий. Предложен способ диффузионного насыщения стальной проволоки в условиях электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования, основанный на совмещении электроконтактного нагрева и термоциклирования, осуществляемого по маятниковой схеме. Предложена методика оптимизации режимов диффузионного легирования и диффузионного отжига стальной проволоки при изменении диаметра проволоки, химических составов материала проволоки и насыщающей среды, времени обработки.

Ключевые слова: защитные покрытия, легирующие элементы, сложнелегированная проволока, диффузионное насыщение, термоциклирование.

Введение. Для формирования восстановительных покрытий используется проволока с подходящим химическим составом. Вид и количество легирующих элементов, входящих в состав присадочного материала, определяют защитные функции и долговечность формируемого покрытия. Производители предлагают высоколегированную проволоку, отличающуюся высокой стоимостью, что делает экономически невыгодным её использование при упрочнении или восстановлении дешевых малоресурсных деталей. Кроме того, большинство предприятий не имеет финансовой возможности для приобретения проволоки различных марок для защиты поверхностей, работающих в конкретных условиях.

Оптимальным вариантом является покупка дешевой углеродистой проволоки, которая будет использоваться в качестве основы для изготовления экономнелегированного материала с требуемым химическим составом. Последующее диффузионное насыщение позволит получить необходимое содержание легирующих элементов в присадочном материале и формируемом покрытии путем подбора состава насыщающей смеси и режимов термического воздействия [1].

Диффузионное насыщение длинномерных изделий в печи в порошковых смесях – трудоемкий процесс. Предприятие должно располагать оборудованием, позволяющим нагреть проволоку до требуемой температуры. Кроме того, необходимы специальные контейнеры [2], обеспечивающие равномерное насыщение проволоки в продольном и поперечном направлении. Их применение ограничивает протяженность проволочного материала и сужает возможную область использования проволоки. Альтернативным решением является диффузионное насыщение путем электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования [3; 4]. При этом под электроконтактным нагревом понимается технологический процесс сквозного нагрева металла за счет тепловой энергии протекающего по металлу электрического тока [5]. Способ позволит повысить производительность процесса диффузионного насыщения и получить экономнелегированную проволоку с требуемой концентрацией легирующих элементов.

Методы. Реализовать способ диффузионного насыщения проволоки путем электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования [6] можно на специальной установке [7] (рисунок 1), состоящей из трансформатора 1; контейнера с насыщающей смесью 2; токопроводящих роликов 3; блока управляющих импульсов 4; регулятора 5. Работает установка следующим образом: необработанная проволока проходит контейнер 2 с насыщающей смесью со скоростью $V = 0...0,1$ м/мин. К токопроводящим роликам 3 подается электрический ток от трансформатора 1. Блок управляющих импульсов 4 через регулятор 5 обеспечивает реализацию режима термоциклирования. Электрический ток пропускали через проволоку циклически с длительностью импульса 1...10 секунд и длительностью паузы 1...3 секунды. Силу тока изменяли от 15 до 30 А при постоянном напряжении 16,8 В.

Нами проведено диффузионное насыщение проволоки СВ08Г2С ГОСТ 2246-80 диаметром 1,2 мм бором, цинком, титаном и алюминием. Диффузионное насыщение проволоки осуществляли: *бором* в порошке ферробора ФБ 17 (17% В) ГОСТ (14848-69) и смеси, состоящей из 99% V_4C + 1% NaF; *титаном* в порошке ферротитана ФТи 35 (35% Ti) ГОСТ 4761-91; *алюминием* в смеси, состоящей из оксида алюминия (Al_2O_3) и чистого алюминия (Al).

Металлографические исследования проволоки, покрытий проводили на шлифах, изготовленных в соответствии с ГОСТ 9.302. Использовали металлографический комплекс на базе микроскопа Nikon-EpiPhot. Измерение микротвердости структурных составляющих проводили на микротвердомере IdentaMet 1106 (Викерс) с камерой UI-1540С и управляющим компьютером в комплекте. Кроме того, проведены исследования зависимости производительности борирования проволоки, измеряемой в $г/мм^2 \cdot мин$ (количество

легирующего элемента, введенного в единицу площади за единицу времени), от фракционного состава насыщающей среды. Для этого порошок ферробора в зависимости от фракционного состава частиц был разделен на четыре группы: первая группа – до 63 мкм; вторая – от 63 до 160 мкм; третья – от 160 мкм до 200 мкм; четвертая группа – от 200 до 315 мкм.

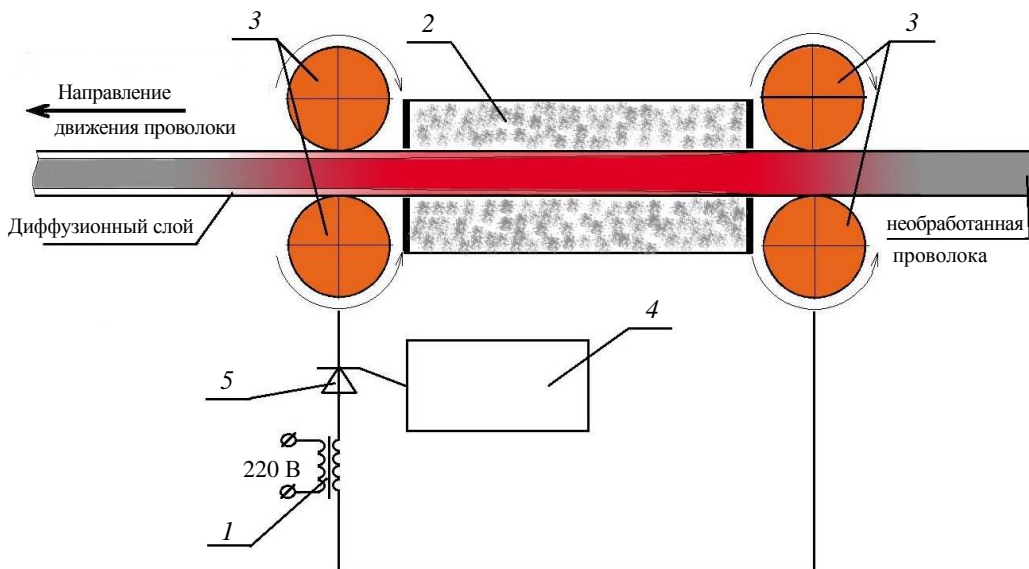


Рисунок 1. – Схема лабораторной установки для диффузионного насыщения проволоки

Разработана методика (рисунок 2), позволяющая назначить оптимальный режим обработки для проволоки различного диаметра, которую предстоит подвергнуть диффузионному насыщению в конкретной среде для получения материала определенного химического состава.



Рисунок 2. – Методика оптимизации режимов диффузионного легирования и диффузионного отжига проволоки в условиях циклического электронагрева

При заданной силе тока определяется время нагрева (длительность импульса τ_n) и охлаждения (длительность паузы $\tau_{n'}$) для каждого цикла обработки.

Первоначально определяли максимальный и минимальный режимы обработки проволоки.

Максимальный режим обработки – режим, при котором проволока нагревается до температуры, близкой к температуре плавления: проволока оплавляется, но при этом обеспечивается непрерывность процесса (максимально возможная длительность импульса $\tau_{n_{max}}$ и минимально возможная длительность паузы $\tau_{n'_{min}}$). Кроме этого, при назначении данного режима необходимо учитывать особенности насыщающей среды – отсутствие пирроэффекта, возгорания насыщающей среды.

При минимальном режиме обработки проволока нагревается до видимого красного свечения (минимально возможная длительность импульса $\tau_{n_{min}}$ и максимально возможная длительность паузы $\tau_{n'_{max}}$). Данный режим обработки зависит от характеристик и свойств обрабатываемой проволоки.

Далее назначались два пробных режима обработки:

1) длительность импульса определялась путем уменьшения максимальной длительности импульса на величину, не превышающую 1 секунду; длительность паузы – минимальная. При этом на поверхности проволоки полностью исключались участки оплавления;

2) длительность импульса минимальная, длительность паузы меньше максимальной длительности паузы на 1 секунду.

Проводились металлографические исследования с целью определения качества выполненной обработки: наличие и толщина диффузионного слоя, значение микротвердости диффузионного слоя и материала проволоки. Определялся режим с наилучшим качеством диффузионного слоя.

Далее назначались режимы обработки:

- путем уменьшения длительности импульса – если выбран максимальный режим обработки;

- путем увеличения длительности импульса – если выбран минимальный режим.

Назначение режимов обработки производят до получения оптимального результата.

Основная часть. Разработанная методика позволила назначить длительность импульса и длительность паузы для насыщения проволоки цинком – $\tau_n = 0,15$ с, $\tau_{n'} = 1$ с; алюминием, бором и титаном – $\tau_n = 10$ с, $\tau_{n'} = 1$ с.

Микроструктура алитированной проволоки представлена на рисунке 3.

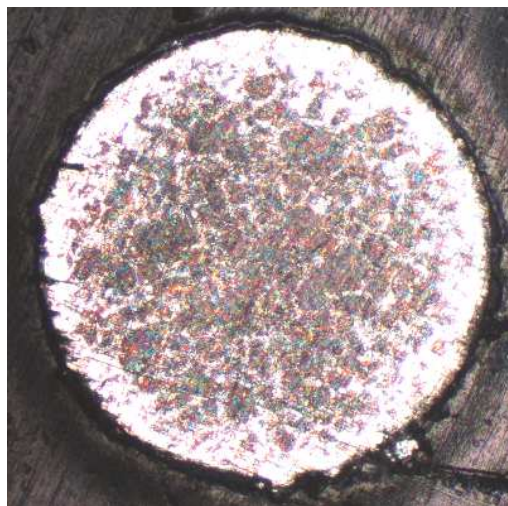
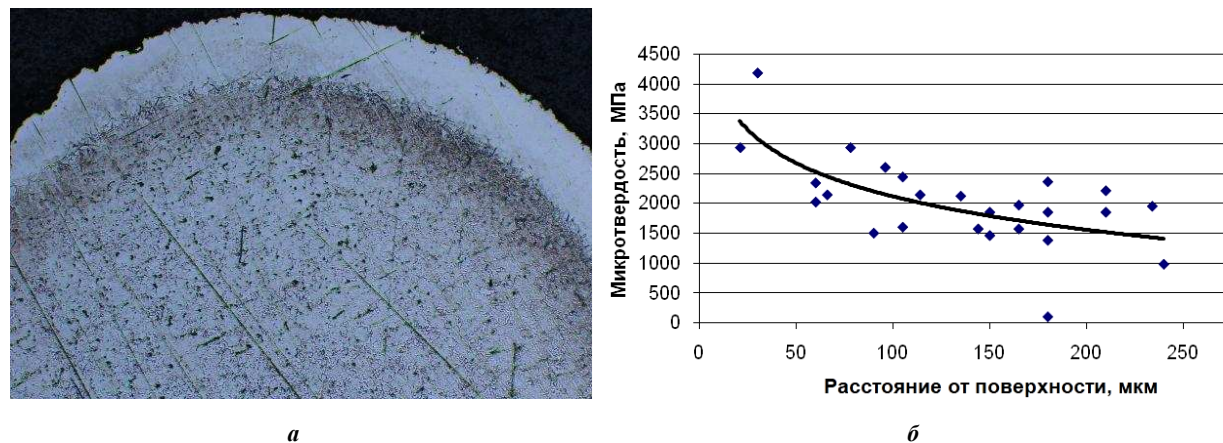


Рисунок 3. – Микроструктура алитированной проволоки, $\times 50$

Металлографические исследования проволоки, подвергнутой диффузионному насыщению бором в порошке ферробора ФБ 17, показали, что формирования химического соединения (FeB и FeB_2) не происходит. Микротвердость диффузионного слоя соответствует микротвердости твердого раствора бора в α -железе. Градиент концентрации бора в поперечном сечении проволоки в направлении от поверхности к центру меньше по сравнению с диффузионным насыщением в печи. Это снижает риск скалывания сформированного слоя, предотвращая тем самым уменьшение концентрации легирующего элемента в процессе формирования восстановительного покрытия. При этом качество поверхности

намного лучше, чем у проволочного материала, подвергнутого диффузионному насыщению в условиях печного нагрева.

Металлографические исследования проволоки, подвергнутой диффузионному насыщению титаном, подтвердили формирование сплошного слоя (рисунок 4, а). Значение микротвердости диффузионного слоя плавно снижается от 3500...4200 МПа на поверхности образца до 1200...1500 МПа на видимой границе раздела «слой – сердцевина» (рисунок 4, б).



а – микроструктура, $\times 100$; б – изменение микротвердости в поперечном сечении

Рисунок 4. – Титанированная проволока

Исследование влияния составов, используемых для диффузионного насыщения в режиме термоциклирования смесей [8], показало, что в качестве насыщающей среды предпочтительно применять порошки чистых металлов либо порошки химических веществ, из которых выделение активных атомов легирующего элемента не требует длительного времени и высокой температуры. Это обусловлено особенностями диффузионного насыщения стальной проволоки путем пропускания тока через изделие, при котором температура проволоки выше температуры насыщающей смеси и температура процесса постоянно меняется. В случае применения химических веществ, разлагающихся при высокой температуре в условиях длительной изотермической выдержки, диффузионный слой формироваться не будет из-за недостаточности времени для выделения активных атомов легирующего элемента. Так, при насыщении проволоки бором в смеси, содержащей 99% B_4C + 1% NaF, формирования диффузионного слоя не наблюдалось.

Исследования влияния фракционного состава насыщающей среды на производительность процесса показали, что диффузионный слой наибольшей толщины формируется при размере частиц до 63 мкм. Однако в этом случае местами наблюдается значительное прилипание частиц к поверхности проволоки, препятствующее её прохождению между электроконтактными роликами, что делает процесс насыщения нестабильным. Вследствие этого для борирования стальной проволоки рекомендуется применять насыщающую среду с размером частиц от 63 до 160 мкм.

Заключение. Предложенный способ позволяет получить относительно недорогую проволоку по сравнению со сложнелегированным проволочным материалом и за значительно меньший период времени по сравнению с традиционным насыщением в печи (время нахождения каждого микрообъема металла проволоки в зоне диффузионного насыщения составляет 2...4 минуты вместо нескольких часов). К тому же нет ограничений по длине обработки. Полученная экономно-легированная проволока может использоваться не только как присадочный материал при формировании защитного покрытия, но и как готовое изделие.

Таким образом, на основании проведенного исследования можно сделать следующие *выводы*:

- применение сложнелегированной проволоки для формирования восстановительных покрытий не всегда экономически оправданно. Представляется актуальным замена дорогостоящего материала на менее затратную экономно-легированную проволоку при восстановлении или упрочнении недорогих малоресурсных деталей.

- диффузионное насыщение, реализуемое путем совмещения электроконтактного нагрева и термоциклирования, – один из способов получения дешевой экономно-легированной проволоки защитных покрытий;

- разработанная методика позволяет назначить оптимальное время нагрева (длительность импульса $\tau_{и}$) и охлаждения (длительность паузы $\tau_{н}$) при заданной силе тока для диффузионного насыщения путем

электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования проволоки различного диаметра из разных сред. Назначены режимы для насыщения проволоки СВ08Г2С ГОСТ 2246-80 диаметром 1,2 мм: цинком – $\tau_u = 0,15$ с, $\tau_n = 1$ с; алюминием, бором и титаном – $\tau_u = 10$ с, $\tau_n = 1$ с.

- диффузионное насыщение стальной проволоки с применением циклического электронагрева имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при назначении режима обработки и выборе состава насыщающей среды. Так, в качестве насыщающей среды следует использовать порошки чистых металлов либо порошки химических веществ, из которых выделение активных атомов легирующего элемента не требует длительного времени и высокой температуры. Имеет значение фракционный состав. Для борирования стальной проволоки рекомендуется применять насыщающую среду с размером частиц от 63 до 160 мкм;

- применение электрического тока, проходящего через проволоку с длительностью импульса 0...10 секунд и длительностью паузы 0...3 секунды, позволяет повысить производительность диффузионного насыщения стальной проволоки различными химическими элементами, снижая время обработки каждого микрообъема проволоки с нескольких часов до 2...4 минут.

ЛИТЕРАТУРА

1. Boride hard-facing : pat. US 4172162 / Ronald H. Smith. – Publ. date Oct. 23, 1979.
2. Контейнер для химико-термической обработки проволоки : полез. модель ВУ 695В 21F21/00 / В.М. Константинов, А.С. Губанов, Ф.И. Пантелеенко, М.В. Семенченко. – Оpubл. 30.12.02.
3. Семенченко, М.В. Диффузионное насыщение стальной проволоки в условиях электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования / М.В. Семенченко // Тенденции развития науки и образования. – 2017. – № 32-4. – С. 60–61.
4. Семенченко, М.В. Электроконтактный нагрев в режиме термоциклирования – перспективный способ получения экономно-легированной проволоки / М.В. Семенченко // Инновационные технологии в машиностроении : электрон. сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию Полоцкого государственного университета / Полоц. гос. ун-т ; под ред. В.К. Шелега ; Н.Н. Попок, 2018. – С. 121–124.
5. Романов, Д.И. Электроконтактный нагрев металлов / Д.И. Романов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1981. – 168 с.
6. Способ диффузионного насыщения стальной проволоки : пат. ВУ 13370 / В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич, А.С. Губанов. – Оpubл. 30.06.2010.
7. Установка для электротермической обработки проволоки : пат. ВУ 696 / В.М. Константинов, А.С. Губанов, С.Н. Абраменко, М.В. Семенченко. – Оpubл. 30.12.02.
8. Семенченко, М.В. Технологические особенности электроконтактной обработки в режиме термоциклирования / М.В. Семенченко // Инновационные технологии в машиностроении : материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию акад. П.И. Ящерицына и 40-летию машиностроительного факультета Полоцкого государственного университета ; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2015. – С. 181–183.

Поступила 21.08.2018

IMPROVING THE PERFORMANCE OF DIFFUSION SATURATION OF THE ELECTRIC WIRE BY HEATING IN THE REGIME OF THERMAL CYCLING

M. SEMENCHENKO

The prospects of creation of a wire material of a certain chemical composition for the formation of protective coatings are noted. The method of diffusion saturation of a steel wire in the conditions of electrocontact heating in the mode of thermal cycling is offered. The method is based on the combination of electrocontact heating and thermal cycling, carried out by pendulum circuit. The technique of optimization of modes of diffusion alloying and diffusion annealing of a steel wire at change of diameter of a wire, chemical compositions of a material of a wire and the saturating environment, time of processing is offered.

Keywords: protective coatings, alloying elements, complex-alloyed wire, diffusion saturation, thermal cycling.