

УДК 621.785.545

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-25-29

ТЕХНОЛОГИЯ ДИФфуЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРОВОЛОКИ ПУТЕМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРЕВА

М.В. СЕМЕНЧЕНКО

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Представлена установка для диффузионного насыщения и термической обработки проволоки электроконтактным циклическим нагревом путем ее непрерывной и ступенчатой подачи. Установка допускает обработку с длительностью импульса и длительностью паузы 0,01 с – 999 мин с заданной силой тока при максимальном значении 100 А и выбранной величиной напряжения из диапазона 3–32 В. Скорость движения проволоки в зоне обработки в базовом исполнении составляет 10 см/мин. Проведены исследования влияния фракционного состава насыщающей среды на протекание процесса диффузионного насыщения проволоки. Для борирования стальной проволоки рекомендовано применять насыщающую среду с размером частиц 63–160 мкм. Предложена методика оптимизации режимов диффузионного насыщения и термической обработки проволоки при изменении диаметра проволоки, химического состава материала проволоки и насыщающей среды, а также времени обработки.

Ключевые слова: технология, установка, проволока, диффузионное насыщение, термоциклирование, электроконтактный нагрев, порошковая среда.

Введение. Химический состав проволоки, применяемой для формирования защитных и восстановительных покрытий, напрямую зависит от условий эксплуатации последних. Количество и вид вводимых легирующих элементов определяют характеристики формируемого слоя. Широкая номенклатура выпускаемых легируемых проволочных материалов не всегда позволяет выбрать оптимальный вариант для восстановления геометрии или упрочнения поверхности дешевых деталей. Перечень материалов, закупаемых предприятием, ограничен не только финансовыми возможностями, но и необходимостью выделения складских помещений для хранения приобретаемых позиций.

В такой ситуации представляется перспективным изготовление небольшого количества экономно-легирующей проволоки, имеющей дешевую основу. Путем введения подходящих легирующих элементов можно получить наплавочный материал для формирования защитных и восстановительных покрытий с нужными свойствами. Для этого предприятие должно располагать оборудованием, допускающим нагрев до температуры, при которой возможно протекание диффузионных процессов. Диффузионное насыщение проволоки в условия печного нагрева трудоемко, предполагает использование специальных контейнеров¹ для равномерного распределения легирующих элементов по поверхности. Применение электролитической ванны позволит получить композиционное покрытие, но существенно увеличит затраты на изготовление и потребует закупки дорогостоящего оборудования для реализации процесса².

В качестве альтернативного способа представляется перспективным диффузионное насыщение проволоки путем электроконтактного циклического нагрева³ [1]. При этом под электроконтактным нагревом понимается технологический процесс сквозного нагрева металла за счет тепловой энергии протекающего по металлу электрического тока [2]. Способ обеспечивает повышение производительности процесса диффузионного насыщения. Термическая обработка стальной проволоки путем электроконтактного циклического нагрева дает возможность получить проволочный материал с требуемыми механическими свойствами.

Основная часть. Для реализации технологии диффузионного насыщения и термической обработки проволоки путем электроконтактного циклического нагрева нами разработана специальная установка⁴ (рисунок 1), которая состоит из трансформатора 1, устройства для контроля силы электрического тока, проходящего через стальную проволоку, и температуры упомянутой проволоки 2, соединенного с блоком управле-

¹ Контейнер для химико-термической обработки проволоки: пат. РФ № 695В 21F 21/00 / В.М. Константинов, А.С. Губанов, Ф.И. Пантелеев, М.В. Семенченко. – Оpubл. 30.12.02.

² Композиционная сварочная проволока: пат. № 2416504 МПК (2006) В23К 35/02, В23К 35/10 / С.Г. Паршин, С.С. Паршин. – Оpubл. 20.04.2011.

³ Семенченко М.В. Электроконтактный нагрев в режиме термоциклирования – перспективный способ получения экономно-легирующей проволоки [Электронный ресурс] // Инновационные технологии в машиностроении: электрон. сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та / под. ред. В.К. Шелега, Н.Н. Попок. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2018. – С. 121–124.

⁴ Установка для диффузионного насыщения стальной проволоки: заявка ВУ а 20220105 / М.В. Семенченко. – Оpubл. 30.12.23.

ния, выполненного в виде твердотельного реле 3, соединенного в свою очередь с контроллером 4, подключенным к источнику питания 5 на 12 В, контейнера с насыщающей смесью 6, на противоположных концах которого расположены пары токоподводящих сопрягаемых роликов 7, барабан для обработанной проволоки 8.

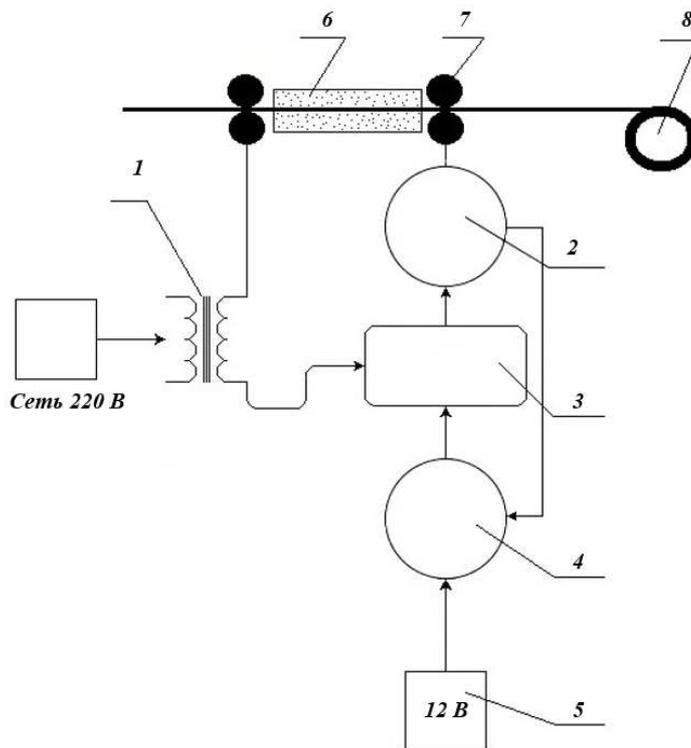


Рисунок 1. – Установки для диффузионного насыщения проволоки

Порядок работы установки следующий: от размоточного механизма (на схеме не показан) необработанная стальная проволока проходит контейнер 6 с насыщающей смесью с заданной постоянной скоростью или подается ступенчато с заданным шагом в зону обработки. Трансформатор 1, работающий от сети 220 В, обеспечивает подачу тока на токоподводящие ролики 7. Контроллер 4, соединенный с твердотельным реле 3, работает от источника питания 5. Сила электрического тока, проходящего через опытный образец, и температура стальной проволоки контролируются с помощью устройства для контроля силы электрического тока через стальную проволоку, и температуры упомянутой проволоки 2. Специальное электронное табло позволяет задать нужную величину. Максимальная величина силы тока может равна 100 А, что дает возможность обрабатывать проволочный материал большого диаметра.

Термоциклирование обеспечивается парой твердотельное реле 3/контроллер 4. Контроллер 4, работающий от источника питания 5, позволяет задать время нагрева и охлаждения образца во время обработки. При поступлении управляющего сигнала от контролера 4 твердотельное реле 3 разрывает цепь. Стальная проволока охлаждается. После завершения заданного времени охлаждения контроллер 4 отправляет сигнал на твердотельное реле 3. Цепь замыкается. Стальная проволока начинает нагреваться. Цикл обработки повторяется. Технические характеристики разработанной установки позволяют выбрать время нагрева и охлаждения из диапазона 0,01 с – 999 мин. Скорость движения проволоки в зоне обработки в базовом исполнении – 10 см/мин. Однако при необходимости может быть изменена. Величина напряжения регулируется и составляет 3–32 В.

Ступенчатая обработка в режиме термоциклирования реализуется за счет наличия связи между устройством для контроля силы электрического тока, проходящего через стальную проволоку, и температуры проволоки 2 и контроллером 4. При достижении заданных параметров устройство для контроля силы электрического тока через стальную проволоку, и температуры упомянутой проволоки 2 отправляет управляющий сигнал на контроллер 4 для изменения режима обработки.

Термическая обработка стальной проволоки в режиме термоциклирования может производиться в защитной атмосфере, для размещения которой используется контейнер с насыщающей смесью 6, либо без нее. Ступенчатая термическая обработка в режиме термоциклирования реализуется за счет наличия связи между устройством для контроля силы электрического тока, проходящего через стальную проволоку, и температуры проволоки 2 и контроллером 4. Изменение режима термической обработки происходит при получении контроллером управляющего сигнала от устройства для контроля силы электрического тока, проходящего через стальную проволоку, и температуры упомянутой проволоки 2.

Нами проводилось диффузионное насыщение проволоки Св 08Г2С ГОСТ 2246-80 диаметром 1,2 мм бором, титаном и алюминием⁵. Диффузионное насыщение проволоки бором осуществляли в порошке ферробора ФБ 17 (17% В) ГОСТ 14848-69 и смеси, состоящей из 99% В4С + 1% NaF, титаном – в порошке ферротитана ФТи 35 (35 % Ti) ГОСТ 4761-91, алюминием – в смеси, состоящей из оксида алюминия (Al₂O₃) и чистого алюминия (Al). Электрический ток пропускали через проволоку циклически с длительностью импульса 1–10 с и длительностью паузы 1–3 с. Обработка производилась по маятниковой схеме, исключающей выдержку обрабатываемого проволочного материала при максимальной и минимальной температурах. Нагрев и охлаждение выполнялись непрерывно в течение заданного временного интервала.

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.

Анализировалась зависимости между производительностью борирования проволоки, измеряемой в г/мм²*мин (количество легирующего элемента, введенного в единицу площади за единицу времени), и фракционным составом насыщающей среды. Для этого порошок ферробора был разделен на четыре группы в зависимости от фракционного состава частиц: 0–63 мкм, 63–160 мкм, 160–200 мкм и 200–315 мкм соответственно.

Для оптимизации режима обработки проволоки разработана методика (рисунок 2), позволяющая назначить при заданной силе тока время нагрева (τ_u) и охлаждения (τ_n) для каждого цикла обработки в зависимости от диаметра проволоки.



Рисунок 2. – Методика оптимизации режимов диффузионного насыщения и термической обработки проволоки в условиях электроконтактного циклического электронагрева

На первом этапе опытным путем устанавливались максимальный и минимальный режимы обработки проволоки. Под максимальным режимом обработки подразумевается режим, при котором материал проволоки нагревается до температуры, близкой к температуре плавления, т.е. режим, при котором проволока оплавляется, но при этом обеспечивается непрерывность процесса (максимально возможная длительность импульса $\tau_{u\max}$ и минимально возможная длительность паузы $\tau_{n\min}$). Дополнительно учитывались особенности насыщающей среды. Недопустимо наличие пирроэффекта, возгорание насыщающей среды.

⁵ Способ диффузионного насыщения стальной проволоки: пат. № 13370 МПК (2009) С 23С 8/00, С 23С 10/00, С 23D 1/34 / В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич, А.С. Губанов. – Опубл. 30.06.2010.

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

Далее назначались два пробных режима обработки:

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

– длительность импульса – минимальная, длительность паузы меньше максимальной длительности паузы на 1 с.

По результатам проведенных металлографических исследований оценивалась проведенная обработка: наличие и толщина диффузионного слоя, значение микротвердости диффузионного слоя и материала проволоки. Выбирался режим с наилучшим качеством диффузионного слоя.

Далее режим обработки устанавливался путем уменьшения длительности паузы (если выбран максимальный режим обработки) и увеличения длительности импульса (если выбран минимальный режим). Назначение режимов обработки производилось до получения оптимального результата.

Разработанная методика позволила выбрать для насыщения проволоки цинком: $\tau_u = 0,15$ с, $\tau_n = 1$ с, алюминием и титаном: $\tau_u = 10$ с, $\tau_n = 1$ с. Микроструктура алитированной проволоки представлена на рисунке 3.

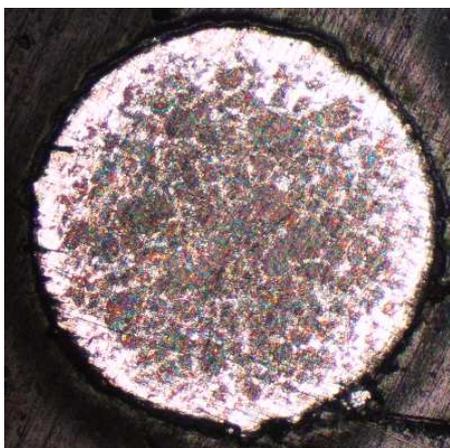


Рисунок 3. – Микроструктура алитированной проволоки, $\times 50$

Металлографические исследования проволоки, подвергнутой диффузионному насыщению бором, 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, что снижает риск скалывания сформированного слоя (и, как следствие, уменьшения концентрации легирующего элемента) в процессе формирования восстановительного покрытия. При этом качество поверхности намного выше.

Исследование влияния составов смесей, используемых для диффузионного насыщения проволоки в режиме электроконтактного циклического нагрева, свидетельствует о том, 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 и в результате длительной изотермической выдержки, формирование диффузионного слоя проходить не будет из-за недостаточности времени для выделения активных атомов легирующего элемента. Так, при диффузионном насыщении проволоки бором в смеси, содержащей 99% B_4C + 1% NaF , формирование диффузионного слоя не наблюдалось.

Исследования влияния фракционного состава насыщающей среды на производительность процесса продемонстрировали, что диффузионный слой наибольшей толщины формируется при размере частиц 0–63 мкм. Однако в этом случае местами наблюдается значительное прилипание частиц насыщающей среды к поверхности проволоки, препятствующее ее прохождению между электроконтактными роликами, что делает процесс насыщения нестабильным. Поэтому для борирования стальной проволоки рекомендуется применять насыщающую среду с размером частиц от 63 до 160 мкм.

Предложенная технология диффузионного насыщения и термической обработки позволяет получить относительно недорогую проволоку по сравнению со сложнелегированным проволочным материалом за ограниченный промежуток времени. Время нахождения каждого микрообъема металла проволоки в зоне диффузионного насыщения составляет 2–4 мин вместо нескольких часов при традиционном насыщении в печи. Нет ограничений по длине обработки. Полученная проволока может использоваться как присадочный материал при формировании защитных и восстановительных покрытий, как готовое изделие.

Заключение. Таким образом, можно сделать следующие выводы:

– технология диффузионного насыщения и термической обработки проволоки путем электроконтактного циклического нагрева обеспечивает получение экономно-легированной проволоки, подходящей для восстановления или упрочнения дешевых малоресурсных деталей, или проволоки с нужными механическими свойствами;

– предложенная установка допускает обработку с длительностью импульса и длительностью паузы 0,01 с – 999 мин. Специальное электронное табло позволяет задать величину силы тока при максимальном значении 100 А. Скорость движения проволоки в зоне обработки в базовом исполнении составляет 10 см/мин. Величина напряжения регулируется и составляет 3–32 В;

– разработанная методика позволяет назначить оптимальный режим диффузионного насыщения или термической обработки проволоки различного диаметра и разных сред путем электроконтактного циклического нагрева. Выбраны режимы для насыщения проволоки СВ08Г2С ГОСТ 2246-80 диаметром 1,2 мм цинком: $\tau_u = 0,15$ с, $\tau_n = 1$ с; алюминием и титаном: $\tau_u = 10$ с, $\tau_n = 1$ с;

– применением циклического электронагрева при диффузионном насыщении и термической обработке проволоки имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при назначении режима обработки и выборе состава насыщающей среды. Так, в качестве насыщающей среды предпочтительно 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенченко М.В. Диффузионное насыщение стальной проволоки в условиях электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования // Тенденции развития науки и образования. – 2017. – № 32-4. – С. 60–61.
2. Романов Д.И. Электроконтактный нагрев металлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1981. – 168 с.

REFERENCES

1. Semenchenko, M.V. (2017). Diffuzionnoe nasyshchenie stal'noi provoloki v usloviyakh elektrokontaktnogo nagreva v rezhime termotsiklirovaniya [Diffusion saturation of steel wire under conditions of electric contact heating in the thermal cycling mode]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, (32-4), 60–61. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Romanov, D.I. (1981). *Elektrokontaknyi nagrev metallov*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)

Поступила 11.07.2024

TECHNOLOGY OF DIFFUSION SATURATION AND HEAT TREATMENT OF WIRE BY ELECTROCONTACT CYCLIC HEATING

M. SEMENCHENKO
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

An installation for diffusion saturation and heat treatment of wire by electrocontact cyclic heating is proposed. The equipment allows processing by continuous and stepwise wire feeding. The installation allows processing with a pulse duration and a pause duration of 0,01 seconds – 999 minutes. Allows you to set the current strength at a maximum value of 100 A and select the voltage value from the range of 3–32 V. The speed of movement of the wire in the processing area in the basic version is 10 cm/min. The influence of the fractional composition of the saturating medium on the course of the diffusion saturation of the wire has been studied. It is recommended to use a saturating medium with a particle size of 63–160 microns for borating steel wire. A method is proposed for optimizing the modes of diffusion saturation and heat treatment of wire when changing the diameter of the wire, the chemical composition of the wire material and the saturating medium, and the processing time.

Keywords: *technology, installation, wire, diffusion saturation, thermal cycling, electric contact heating, powder medium.*