

УДК 621.785.545

**М. В. Семенченко**

Учреждение образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»,  
ул. Блохина, 29, 211440 Новополоцк, Республика Беларусь, 8 (0214) 59 95 39, m.semenchenko@psu.by

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕРМОДИФФУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ

Способ диффузионного насыщения стальной проволоки путем непосредственного пропускания электрического тока через изделие в режиме термоциклирования позволяет изготовить материал для последующего формирования защитного покрытия. Для реализации способа ранее была предложена лабораторная установка. В процессе последующей эксплуатации были установлены недостатки, повлекшие необходимость ее модернизации.

При совершенствовании лабораторного оборудования определялся порядок подачи проволоки в зону обработки, исполнение элементов, обеспечивающих подачу напряжения на обрабатываемую проволоку, исполнение формирователя управляющих импульсов, способ реализации режима термоциклирования. Модернизированное оборудование позволяет вести обработку при непрерывной и ступенчатой подаче проволоки с диаметром менее 1 мм. Возможна термическая обработка. Замена пары «тиристор—компаратор» твердотельным реле позволила отказаться от аналогового сигнала в пользу цифрового. Управляющее напряжение выбирается из диапазона 3...32 В при максимальной силе тока 100 А, длительности импульса и паузы 0,01...999 с.

**Ключевые слова:** установка; проволока; химико-термическая обработка; диффузионное насыщение; термоциклирование; пропускание электрического тока; порошковая среда; электроконтактный нагрев.

Рис. 3. Библиогр.: 9 назв.

**M. V. Semenchenko**

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, 29 Blokhin Str.,  
211440 Novopolotsk, the Republic of Belarus, 8 (0214) 59 95 39, m.semenchenko@psu.by

## EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT OF LABORATORY EQUIPMENT FOR STEEL WIRE THERMAL DIFFUSION TREATMENT

The method of diffusion saturation of steel wire by directly passing an electric current through the product in the thermal cycling mode makes it possible to produce a material for the subsequent formation of a protective coating. A laboratory installation to implement the method has previously been proposed. In the course of subsequent operation, shortcomings that necessitated its modernization have been identified.

When improving laboratory equipment, the order of wire feeding into the processing zone, the design of elements providing voltage supply to the processed wire, the design of the control pulse generator, and the method for implementing the thermal cycling mode have been determined. The upgraded equipment allows processing with continuous and stepwise feeding of wire with a diameter of less than 1 mm. Heat treatment is possible. Replacing the “thyristor—comparator” pair with a solid-state relay has made it possible to abandon the analog signal in favor of a digital one. Controlling voltage is selected from the range of 3...32 V at a maximum current of 100 A, pulse duration and pause of 0.01...999 seconds.

**Key words:** installation; wire; chemical and thermal treatment; diffusion saturation; thermal cycling; electric current transmission; powder medium; electric contact heating.

Fig. 3. Ref.: 9 titles.

**Введение.** Химико-термическая обработка (далее — ХТО) находит широкое применение в промышленности. Одним из перспективных направлений развития является ХТО микрообъектов — металлических порошков и проволок [1]. Для получения диффузионно-легированных металлических порошков с использованием ХТО разработаны эффективные приемы интенсификации, установлены особенности структурообразования [2; 3].

Стальная проволока, как объект для ХТО, имеет потенциальные возможности при применении электроконтактного нагрева как источника тепла. Ранее выполненные исследования свидетельствуют о существенном ускорении процесса ХТО [4]. Сферы применения такой

проволоки разнообразны. Она может быть применена как присадка для легирования расплава [5]. Перспективным является ее применение для формирования защитных покрытий, может использоваться как самостоятельное изделие, эксплуатируемое в агрессивной среде.

Способ диффузионного насыщения стальной проволоки путем непосредственного пропускания электрического тока через изделие в режиме термоциклирования позволяет изготовить материал для последующего формирования защитного покрытия [6]. Его особенностью является низкий градиент легирующего элемента по поперечному сечению при достаточной концентрации. Для реализации способа ранее была предложена лабораторная установка. В процессе последующей эксплуатации были установлены недостатки, повлекшие необходимость модернизации оборудования для улучшения технических характеристик.

**Материалы и методы исследования.** При разработке установки для диффузионного насыщения и термической обработки проволоки путем непосредственного пропускания тока через изделия в режиме термоциклирования внимание уделялось:

- порядку подачи проволоки в зону обработки;
- исполнению элементов, обеспечивающих подачу напряжения на обрабатываемую проволоку;
- исполнению формирователя управляющих импульсов;
- способу реализации режима термоциклирования (рисунок 1).

Первый прототип лабораторной установки был предназначен для обработки неподвижной проволоки ограниченной длины и допускал ступенчатую подачу материала в зону обработки [7]. В качестве токоподводящих элементов использовались пластины из сплава на медной основе. Исполнитель управляющих импульсов обеспечивал механическое управление режимами обработки. Режим термоциклирования реализовывала пара «компаратор—тиристор».

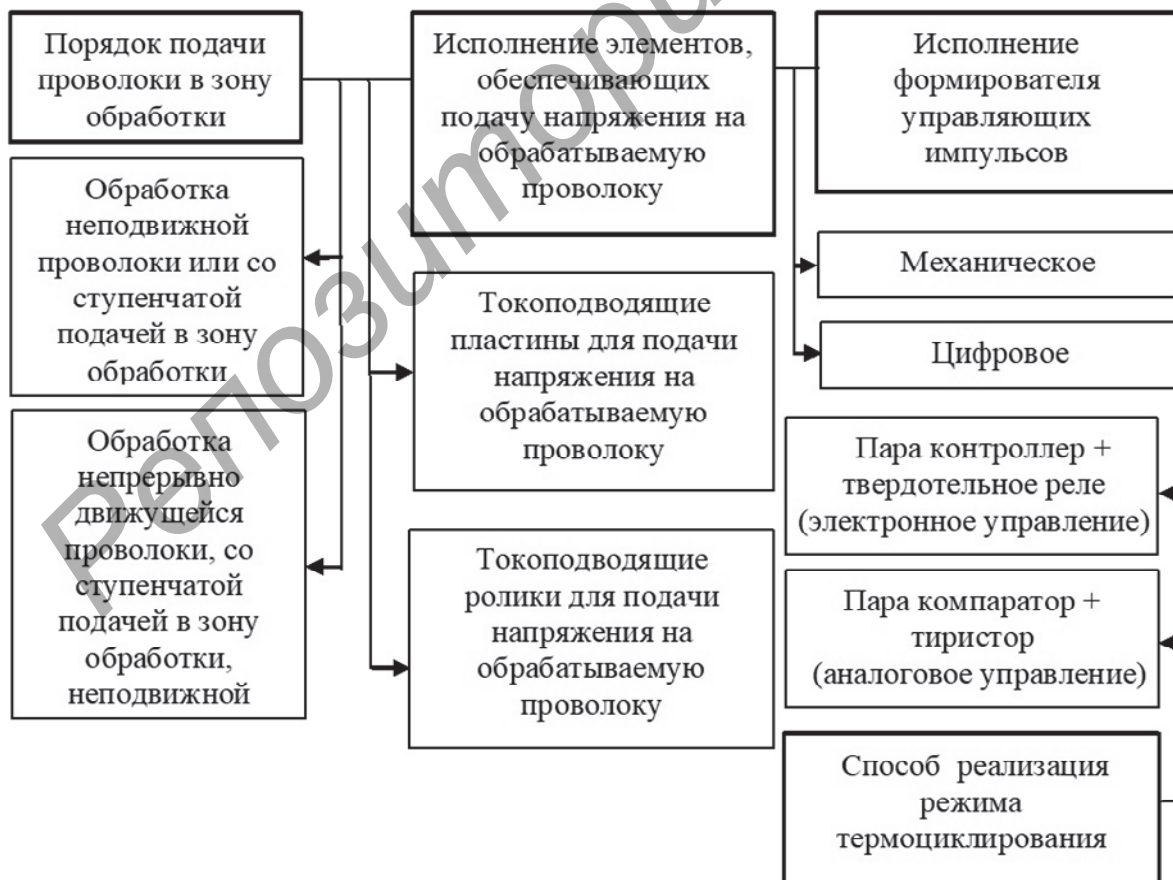


Рисунок 1. — Генезис установки для электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования

Внесенные в последующем конструктивные изменения позволили добавить обработку непрерывно движущейся проволоки [8; 9], что дает возможность получить материал любой протяженности. Установка (рисунок 2) состоит из трансформатора 1, контейнера с насыщающей смесью 2, токопроводящих роликов 3, блока управляющих импульсов 4, включающего компаратор, регулятора 5 (тиристора). Стала возможной обработка непрерывно движущейся с заданной скоростью проволоки, а также подача проволоки в зону обработки с заданным шагом, кратным длине нагрева (расстоянию между токопроводящими роликами 3) или через заданный отрезок времени (время обработки). Также можно производить диффузионное насыщение или термическую обработку неподвижной проволоки ограниченной длины.

Работает установка следующим образом: проволока, подвергаемая диффузионному насыщению, проходит контейнер 2 с насыщающей смесью со скоростью до 0,1 м / мин. При выполнении термической обработки контейнер может отсутствовать. К токопроводящим роликам 3 подается электрический ток от трансформатора 1. Блок управляющих импульсов 4 через регулятор 5 позволяет задать требуемые параметры режима термоциклирования. Электрический ток пропускают через проволоку циклически с длительностью импульса (нагрева) 1...10 с и длительностью паузы (охлаждения) 1...3 с. Сила тока меняется от 15 до 30 А. Напряжение при установившемся режиме работы составляет 16,8 В. Мгновенное значение температуры контролируется оптическим пирометром.

В первом варианте установки формирователь управляющих импульсов, имея цифровое исполнение, не позволял корректно отрегулировать режим оказываемого термического воздействия. Продолжительность нагрева в пределах 1...10 с и охлаждения 1...3 с затрудняла обработку проволоки диаметром менее 1 мм. Для исключения ее плавления и последующего разрушения под действием высокой температуры приходилось увеличивать длину обрабатываемого участка или скорость подачи проволоки в зону обработки. В первом случае это увеличивало продолжительность обработки каждого микрообъема материала, во втором — уменьшалось время оказываемого термического воздействия, что не всегда приводило к желаемым изменениям химического состава или механических свойств.

Нами предложена установка (рисунок 3), позволяющая реализовать диффузионное насыщение проволоки с диаметром менее 1 мм путем непосредственного пропускания тока через изделия в режиме термоциклирования с продолжительностью нагрева или охлаждения менее 1 с. Она состоит из силового трансформатора 1, устройства контроля физических параметров 2, твердотельного реле 3, контроллера 4, источника питания на 12 В 5, токоподводящих роликов 6, контейнера с насыщающей смесью 7.

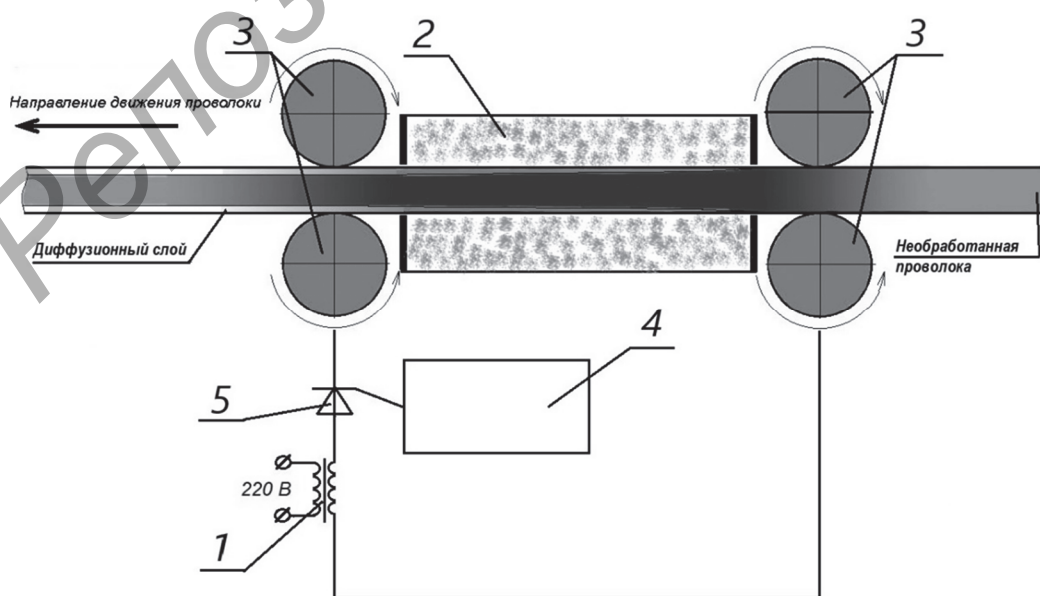
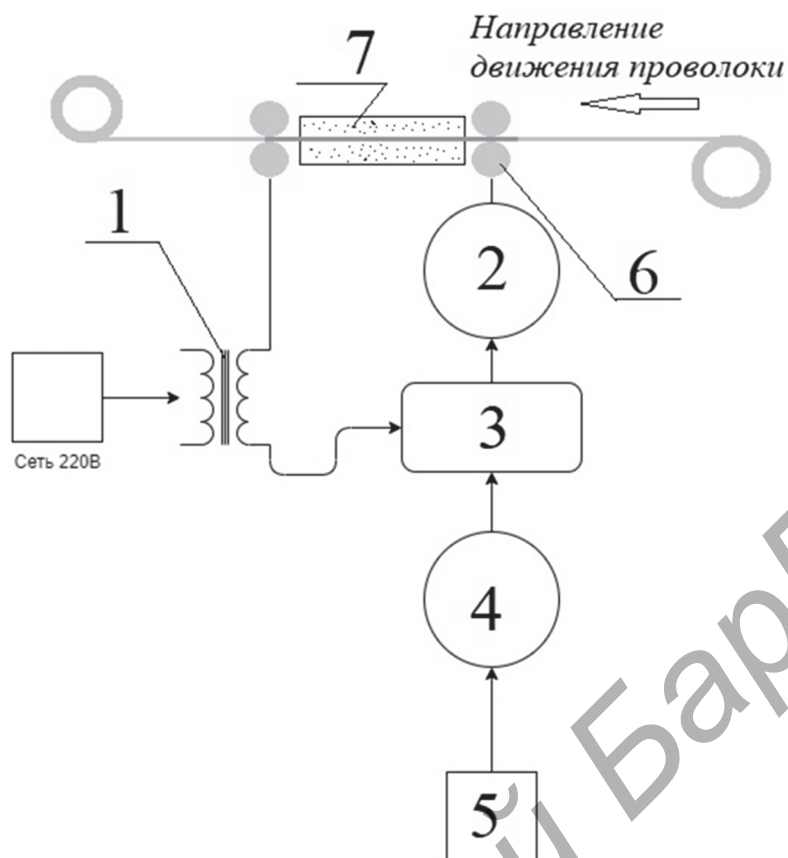


Рисунок 2. — Схема лабораторной установки для диффузионного насыщения проволоки



**Рисунок 3. — Схема лабораторной установки для диффузионного насыщения проволоки с диаметром менее 1 мм**

Работает установка следующим образом: необработанная проволока проходит контейнер 7 с насыщающей смесью с установленной скоростью. Силовой трансформатор 1, работающий от сети 220 В, обеспечивает подачу переменного тока на токоподводящие ролики 6. Контроллер 4 работает от источника питания 5 с напряжением 12 В. Параметры проходящего через проволоку электрического тока контролируются с помощью устройства контроля физических параметров 2. Силовой трансформатор связан с твердотельным реле 3. Контроллер, работающий от источника питания 5, позволяет задать время нагрева и охлаждения образца во время обработки. Электрический ток пропускают через проволоку циклически с длительностью импульса и длительностью паузы от 0,01 до 999 с.

Продолжительность нагрева или охлаждения выбирается в зависимости от диаметра проволоки, ее химического состава, химического состава насыщающей смеси и требуемого уровня термического воздействия. Для выбора режима используется специальное электронное табло. Величина силы тока может быть увеличена до 100 А, что позволяет увеличить диаметр обрабатываемого проволочного материала и длину обрабатываемого участка. Скорость движения в базовом исполнении составляет 10 см / мин, однако при необходимости может быть изменена. Величина напряжения регулируется и составляет 3...32 В.

При поступлении управляющего сигнала от контроллера 4 твердотельное реле 3 размыкает цепь. Проволока охлаждается до заданной температуры. После завершения заданного времени охлаждения контроллер 4 отправляет сигнал на твердотельное реле 3, цепь замыкается, проволока начинает нагреваться, цикл обработки повторяется.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Предложенная лабораторная установка для диффузионного насыщения проволоки путем непосредственного пропускания электрического тока в режиме термоциклирования позволяет изготовить экономно-легированную проволоку с заданным химическим составом. Она является хорошей альтернативой дорого-

стоящим сложнолегированным материалам. Длина обработанного материала не ограничивается конструктивными особенностями лабораторных установок. Возможна ступенчатая и непрерывная подача проволоки в зону обработки при ее диффузионном насыщении или термической обработке.

Переход от пары «компаратор—тиристор» (см. рисунки 1, 2) к паре «контроллер — твердотельное реле» (см. рисунок 3) позволил заменить аналоговый сигнал на цифровой. Это повысило точность обработки, быстродействие блока управления, уменьшилось время, затрачиваемое на переход с режима нагрева на режим охлаждения. Величина силы тока, проходящего через проволоку, контролируется устройством контроля физических параметров, что дополнительно повышает точность оказываемого термического влияния.

Готовая экономно-легированная проволока может применяться как присадочный материал при формировании защитного покрытия путем наплавки или напыления. Ее можно также использовать как готовое изделие. Толщина обрабатываемой проволоки выбирается с учетом назначения. Контроль оказываемого термического воздействия сделал возможным обработку проволоки с диаметром менее 1 мм.

**Заключение.** Модернизированная установка для электротермической обработки проволоки позволяет изготовить экономно-легированную проволоку, предназначенную для использования в качестве присадочного материала при формировании защитных покрытий или самостоятельного изделия.

При разработке конструкции лабораторной установки была проанализирована возможность изменения порядка подачи проволоки в зону обработки, исполнение формирователя управляющих импульсов, токоподводящих элементов, порядок реализации режима термоциклирования, что позволило предложить новую установку с электронным управлением и использованием цифрового сигнала вместо аналогового.

Предложенная лабораторная установка позволяет выбрать управляющее напряжение из диапазона 3...32 В при максимальной силе тока 100 А, длительности импульса и паузы 0,01...999 с. Это делает возможным обработку проволоки с диаметром менее 1 мм с заданными характеристиками.

#### Список цитированных источников

1. *Ворошнин, Л. Г.* Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л. Г. Ворошнин, Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Минск : ФТИ ; Новополоцк : ПГУ, 2001. — 148 с.
2. *Константинов, В. М.* Ускоренная диффузия легирующих элементов в железе при химико-термической обработке порошков во вращающемся контейнере / В. М. Константинов // Докл. НАН Беларуси. — 2007. — Т. 51, № 2. — С. 103—107.
3. *Пантелеенко, Ф. И.* Особенности диффузионных процессов при борировании стальных порошков / Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов // Вес. АНБ. Сер. ФТН. — 1997. — № 1. — С. 8—11.
4. *Семенченко, М. В.* Повышение производительности диффузионного насыщения проволоки путем электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования / М. В. Семенченко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. — 2018. — № 11. — С. 78—82.
5. *Семенченко, М. В.* Модифицирование чугуна экономно-легированной проволокой, полученной путем электрохимико-термической обработки / М. В. Семенченко, В. М. Константинов, Т. В. Михайловская // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. — 2009. — № 8. — С. 26—31.
6. 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 ; дата публ.: 30.06.2010.
7. *Семенченко, М. В.* Электрохимико-термическая обработка проволоки для защитных покрытий : дис. магистра техн. наук : 05.02.01 Материаловедение в машиностроении / М. В. Семенченко ; Полоц. гос. ун-т. — Новополоцк, 2002. — 70 с.
8. Установка для электротермической обработки проволоки : пат. № 696 МПК 7 С21D 1/40 / В. М. Константинов, А. С. Губанов, С. Н. Абраменко, М. В. Семенченко ; дата публ.: 30.12.2002.
9. *Семенченко, М. В.* Совершенствование оборудования для диффузионного насыщения проволоочного материала / М. В. Семенченко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. — 2022. — № 3. — С. 27—31.

Поступила в редакцию 08.04.2024.