

# Методы и устройства выравнивания плотности тока при электрохимической обработке длинномерных изделий микронных толщин

С. Н. Сироткин, Т. А. Воронина

ООО «Научно-технический центр «Трубметпром»,  
ул. Танкистов, 189-Б, г. Челябинск, Россия, e-mail: [Nctrubmetprom@mail.ru](mailto:Nctrubmetprom@mail.ru)

Предложено несколько методов обеспечения равномерного распределения плотности тока на поверхности изделий по длине зон обработки. Один из методов основан на изменении формы электродов по определенному закону. С этой целью проведен теоретический расчет формы электродов для сильных полей. Применение предложенной методики позволило разработать конструкции электродов для проволоки и ленты, обеспечивающие выравнивание плотности тока. Однако наиболее универсальным является метод выравнивания плотности тока по длине длинномерных изделий с применением устройства стабилизации. Реализация способа выравнивания плотности тока с применением данного устройства позволяет: 1) создавать универсальные высокопроизводительные установки для любого процесса электрохимической обработки длинномерных изделий; 2) значительно повысить качество обрабатываемых изделий различного сортамента из металлов с разным удельным сопротивлением, в любых электролитах независимо от их удельного сопротивления и его изменения в процессе работы. Таким образом, разработанные методы и устройства выравнивания плотности тока в рабочих зонах ванн ЭХО позволили предложить и реализовать на практике технические решения по созданию автоматизированных комплексов ЭХО. На основе разработанного устройства выравнивания плотности тока создан высокопроизводительный автоматизированный комплекс ЭХО микроленты, позволяющий проводить любой процесс электрохимической обработки: обезжиривание, комбинированную очистку, полирование ленты из различных марок сталей и сплавов в любых электролитах. Автоматизированный комплекс принят в промышленную эксплуатацию и работает на Петербургском заводе прецизионных сплавов для ЭХО микроленты магнитной записи.

*Ключевые слова:* электрохимическая обработка, плотность тока, длинномерное изделие.

УДК 621.357.8.035

## ВВЕДЕНИЕ

Особо важное значение при электрохимической обработке (ЭХО) длинномерных изделий микронных толщин (ДМИМТ) приобретают соблюдение и улучшение равнотолщинности и геометрии сечения по всей длине изделия, что в свою очередь достигается применением автоматического регулирования процесса. Недостатком известных устройств является то, что в них не решена проблема выравнивания плотности тока на поверхности обрабатываемого изделия по длине ванны. Для обработки длинномерных изделий применяют в основном биполярные ванны [1] непрерывного действия, состоящие из чередующихся катодных и анодных зон. Электроды в зонах обработки, как правило, повторяют форму обрабатываемого изделия.

Установлено [2], что в подобных случаях распределение плотности тока в зонах обработки по длине изделий крайне неравномерно, у перегородок плотность тока в  $5 \div 10$  раз выше, чем в середине зоны. Основная причина неравномерности распределения плотности тока состоит в значительном падении напряжения внутри изделия

из-за его высокого сопротивления, особенно это характерно для изделий микронных толщин.

Неравномерное распределение плотности тока и потенциала по длине обрабатываемого изделия снижает качество электрохимической обработки. При нанесении гальванических покрытий приводит к получению рыхлого осадка различной толщины, а при электрохимическом полировании вызывает растравливание поверхности.

Неравномерность распределения плотности тока по длине рабочих зон, кроме ухудшения качества обработки поверхности, в значительной мере снижает производительность установок ЭХО, так как вынуждает применять средние плотности тока значительно ниже максимально возможных и допустимых. И наконец, неравномерный характер распределения плотности тока в существующих ваннах ЭХО ДМИМТ затрудняет, а в ряде случаев совершенно не позволяет осуществлять автоматическое регулирование процесса обработки, резко снижает его эффективность. Следовательно, для создания высокопроизводительной установки ЭХО ДМИМТ с автоматическим регулированием технологического процесса, прежде всего, необходимо ре-

шить проблему выравнивания плотности тока по длине рабочих зон в ванне ЭХО.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В работе предложено несколько методов обеспечения равномерного распределения плотности тока на поверхности изделий по длине зон обработки. Один из методов основан на изменении формы электродов по определенному закону. С этой целью проведен теоретический расчет формы электродов для сильных полей. Применение предложенной методики позволило разработать конструкции электродов для проволоки и ленты, обеспечивающие выравнивание плотности тока. На рис. 1 представлена конструкция электрода для ЭХО микропроволоки, обладающей высоким омическим сопротивлением.

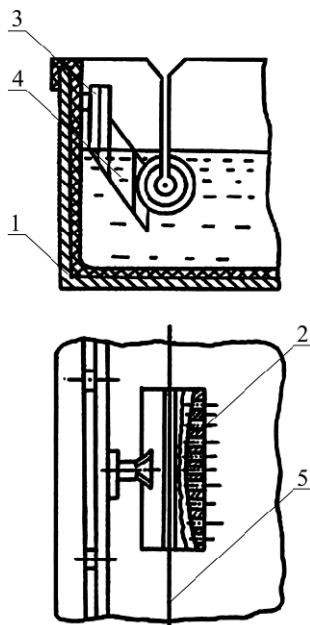


Рис. 1. Конструкция электрода для микропроволоки, обеспечивающего распределение плотности тока по длине рабочих зон при электрохимической обработке: 1 – корпус ванны; 2 – электрод; 3 – токоподвод; 4 – держатель; 5 – микропроволока.

При ЭХО широкой ленты необходимо решать проблему выравнивания плотности тока  $i$  не только по длине  $l$ , но и по ширине  $a$  ленты. С этой целью проведен расчет и разработана конструкция электродов, обеспечивающих равномерное распределение плотности тока по всей поверхности микроленты. Каждый электрод при этом выполняется в виде тела, образованного двумя совмещенными поверхностями параболической формы, развернутыми относительно друг друга на  $90^\circ$ , причем отношение минимального расстояния от поверхности электрода до плоскости ленты к максимальному расстоянию определяется по зависимости

$$\frac{M_{\min}}{M_{\max}} = 1 - \frac{\rho i (a+b) l^2}{a \cdot b \cdot U}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление металла, Ом·см.

Конструкция электрода представлена на рис. 2.

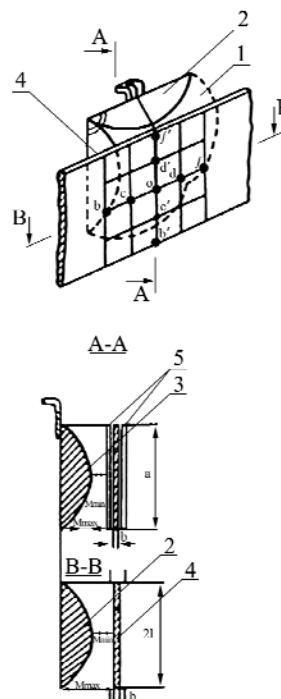


Рис. 2. Устройство для электрохимической обработки микроленты: 1 – электрод; 2, 3 – плоскости параболической формы; 4 – обрабатываемая лента; 5 – проводные каналы.

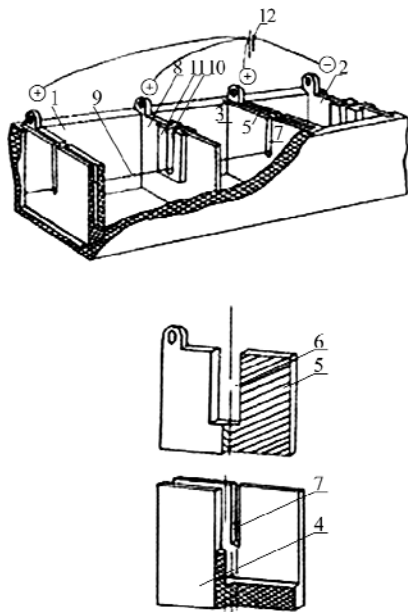
В некоторых случаях равномерное распределение плотности тока на поверхности изделия, например проволоки, по длине зоны обработки достигается применением плоских электродов, если проволоку перемещать по траектории, симметричной относительно середины длины ячейки с углом перегиба  $\alpha$ , определяемым по рассчитанной формуле:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{a \cdot b \cdot \sigma}{(a+b) \cdot \rho \cdot l}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – удельное сопротивление электролита, Ом·см.

На основании проведенных теоретических расчетов разработана установка для получения высококачественной, особо тонкой микропроволоки путем ЭХП. В установке реализуется также третий метод выравнивания плотности тока, обеспечивающий высокую стабильность протекания процесса, что особенно важно для микропроволоки толщиной менее 10 мкм. Установка для ЭХП микропроволоки (рис. 3) с биполярным подводом тока содержит ряд чередующихся анодных и катодных ячеек, разделенных диэлектрическими перегородками–диафрагмами, выполненными из антифрикционного материала.

Электроды находятся посередине рабочих ячеек, причем каждая перегородка–диафрагма выполнена в виде полый диэлектрической пластины, внутри которой размещен дополнительный пластинчатый электрод, а основные электроды расположены параллельно перегородкам–диафрагмам.



**Рис. 3.** Устройство для электрохимической обработки длинномерных изделий: 1, 2 – анодные и катодные ячейки; 3 – перегородки-диафрагмы; 4 – диэлектрическая полая пластина; 5 – дополнительный пластинчатый электрод; 6, 7 – щели; 8 – основные пластинчатые электроды; 9 – обрабатываемое изделие; 10 – щелевидные отверстия; 11 – электроизолирующие насадки; 12 – источник тока.

Пластинчатые дополнительные электроды, вставленные внутрь диэлектрических перегородок–диафрагм, дают возможность протекать электрохимическому процессу в отверстиях последних. При этом выделяющийся газообразный кислород или водород создает в отверстиях диафрагмы «воздушные отсечки», предупреждая утечки тока через электролит и снижая энергопотери. Выполнение основных электродов пластинчатыми и расположение их параллельно дополнительным электродам и перпендикулярно направлению движения обрабатываемого изделия создают равномерное и симметричное относительно перегородок электрическое поле, и вследствие этого ток по обрабатываемому изделию распределяется равномерно, что в свою очередь увеличивает длину зоны обработки с рабочими плотностями тока и позволяет увеличить производительность установки.

Изготовление основных и дополнительных электродов с соосными вертикальными щелевидными отверстиями для прохождения и заправки позволяет обрабатывать изделия различного сортамента без замены перегородок–

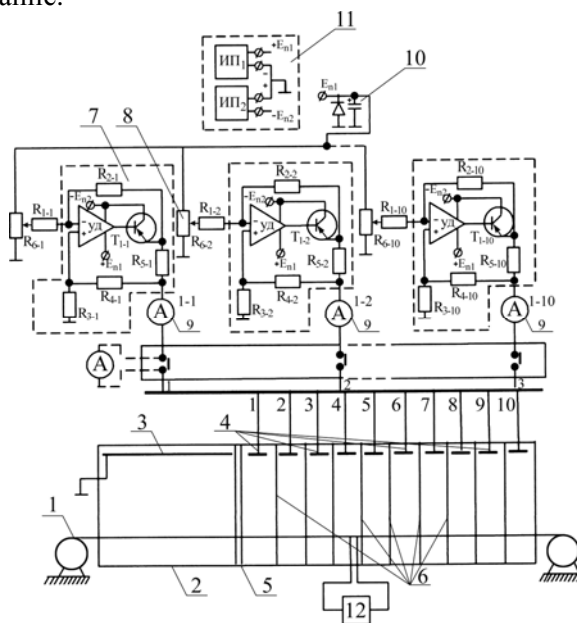
диафрагм и основных электродов. Как показали испытания, использование предлагаемой установки:

1) улучшает равномерность распределения плотности тока и, как следствие этого, повышает: а) качество изделий путем снижения разнотолщинности по длине обрабатываемого изделия в  $1,4 \div 2,5$  раза; б) в  $1,3 \div 2,7$  раза производительность процесса за счет увеличения в  $1,3 \div 2,7$  раза длины зоны ячейки с рабочими плотностями токов;

2) уменьшает утечки тока и, как следствие, на  $55 \div 60\%$  сокращает энергопотери.

Контроль за распределением плотности тока на поверхности изделий подтверждает, что во всех случаях предложенные способы обеспечивают равномерное распределение плотности тока.

Однако наиболее универсальным является четвертый метод выравнивания плотности тока по длине длинномерных изделий с применением устройства стабилизации [3]. На рис. 4 представлена схема устройства для выравнивания плотности тока по длине обрабатываемого изделия в ванне.



**Рис. 4.** Универсальное устройство для электрохимической обработки длинномерных изделий, обеспечивающее равномерное распределение плотности тока по длине зоны обработки: 1 – обрабатываемое изделие; 2 – электрохимическая ванна; 3, 4 – аноды и катоды анодной зоны; 5 – перегородка между анодной и катодной зонами; 6 – перегородки между катодами; 7 – стабилизаторы тока; 8 – токозадающие потенциометры; 9 – амперметры; 10 – источник опорного напряжения; 11 – источник питания; 12 – датчик.

Устройство содержит в анодной зоне ряд последовательно расположенных электродов, разделенных перегородками, каждый из которых подключен к источнику питания через отдельный стабилизатор тока блока задачи тока. Блок

задачи тока выполнен с применением интегральных микросхем операционных усилителей и состоит из:

а) нескольких стабилизаторов тока, каждый из которых подключен к соответствующему электроду анодной зоны для поддержания заданной силы тока на нем. Стабилизаторы тока выполнены таким образом, что величина тока в цепи электрода, благодаря наличию обратной связи, зависит не от величины сопротивления «катод–электролит–анод», которое меняется в процессе ЭХО, а только от входного управляющего напряжения;

б) нескольких потенциометров, регулирующих ток на каждом электроде;

в) панели для подключения амперметров, предназначенных для измерения токов, поступающих на каждый электрод.

Кроме того, в блоке задачи тока находится источник опорного напряжения, служащий для питания токозадающих потенциометров.

Анализ проведенных исследований показывает, что использование ряда стабилизаторов тока, подключенных к соответствующим электродам, способствует выравниванию плотности тока по всей длине зоны обработки.

Реализация способа выравнивания плотности тока с применением данного устройства позволяет:

1) создавать универсальные высокопроизводительные установки для любого процесса электрохимической обработки длинномерных изделий;

2) значительно повысить качество обрабатываемых изделий различного сортамента из металлов с разным удельным сопротивлением в любых электролитах независимо от их удельного сопротивления и его изменения в процессе работы.

Однако при использовании устройства для ЭХО более широкой ленты были выявлены следующие недостатки: устройство не выравнивает плотность тока по ширине изделия, то есть не обеспечивает качество обработки поверхности для широкой ленты; из-за неравномерного распределения по ширине ленты происходит заострение ее кромок.

Для устранения отмеченных недостатков в устройстве для ЭХО ленты было предложено секции ванны выполнить в виде блока ячеек, образованных набором пересекающихся изолирующих перегородок, а электроды установить в этих ячейках. Изготовление секций ванны в виде блока ячеек, образованных набором пересекаемых изолирующих перегородок, и установление электродов в этих ячейках позволяют исключить перетекание тока между секциями электрода,

направить все силовые линии на обрабатываемое изделие и равномерно их распределить по длине и ширине последнего, что способствует выравниванию плотности тока на всей поверхности изделия. На рис. 5 изображена блок-схема устройства, на рис. 6 – схема блока ячеек; на рис. 7 – вариант блока ячеек с перпендикулярным расположением перегородок; на рис. 8 – схема отдельной ячейки.

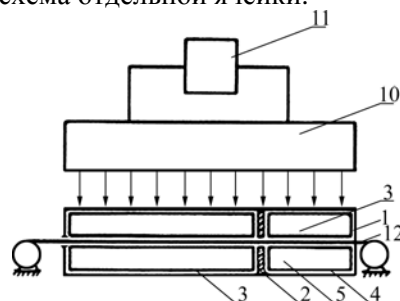


Рис. 5. Блок-схема устройства для выравнивания плотности тока при электрохимической обработке ленты.

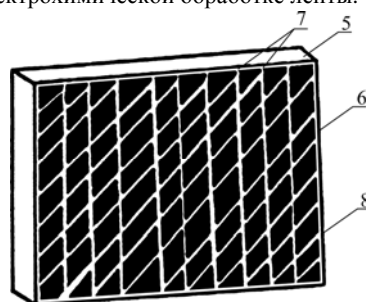


Рис. 6. Схема блока ячеек устройства выравнивания плотности тока.

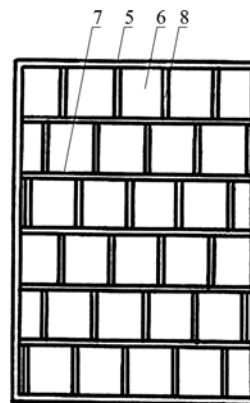


Рис. 7. Вариант блока ячеек с перпендикулярным расположением перегородок.



Рис. 8. Схема отдельной ячейки.

Устройство содержит ванну 1, разделенную перегородкой 2 на анодную 3 и катодную 4 зоны.

Секции ванны выполнены в виде блока 5 ячеек 6, образованных набором пересекаемых перегородок 7, 8 и имеющих в поперечном сечении формы параллелограмма и треугольника, когда перегородки 8 не перпендикулярны перегородкам 7 и сдвинуты относительно перегородок 8 соседних секций. В ячейках установлены электроды 9, соединенные с отдельными стабилизаторами блока 10 задачи тока. Блок 10 соединен с источником питания 11. Устройство работает следующим образом: обрабатываемое изделие 12, например микроленту, протягивают через рабочую ванну 1 с электролитом, в которой установлены блоки 5 ячеек 6 с электродами 9, подключают каждую секцию электрода через отдельный стабилизатор блока 10 задачи тока к источнику питания 11 и проводят ЭХО.

В лабораторных условиях устройство опробовано для электрохимической обработки микроленты толщиной 10 мкм, шириной 5 см Fe-Cr-Ni сплава. Для обработки использовали электролит состава (масс.%):  $H_3PO_4$  – 70, БСП – 0,05, вода – до 100. Расстояние от ленты до электродов устанавливали равным 1 см, обработку проводили при плотности тока,  $A/cm^2$ : 1, 2 и 3.

Продольный и поперечный размеры зоны обработки – 5 см, размер секций по длине и ширине зоны обработки составлял по 0,5 см. Для устройства рассчитывали распределение потенциала по секциям электрода для поддержания и контроля требуемой плотности тока. Расчет потенциалов проводили по формуле

$$E_{\Sigma} = -\frac{i_0^{(1)} Z_0}{\lambda} - \frac{4L_0}{\sigma\pi^2} \cdot i_0^{(1)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi(2k-1)(2n-1)\Delta x}{2L_0}}{(2k-1)^2 \operatorname{th} \frac{\pi}{2} (2k-1) \frac{Z_0}{L_0}}, \quad (3)$$

где  $E_{\Sigma}$  – требуемое значение потенциала по секциям электрода, В;  $i_0^{(1)}$  – плотность тока на поверхности ленты,  $A/cm^2$ ;  $Z_0$  – расстояние от ленты до электродов, см;  $\sigma$ ,  $\lambda$  – удельное сопротивление материала ленты и электролита соответственно, Ом·см;  $a_0$  – толщина ленты, мкм;  $n$  – номер ячейки по длине ленты;  $\Delta x$  – размер ячейки по длине ленты, см;  $L_0$  – продольный размер зоны обработки, см;  $k$  – номер члена суммы.

Устройство позволяет поддерживать и контролировать заданную плотность тока по всей поверхности изделия в зонах обработки, задавая развертку потенциала по секциям электрода.

Разработанное устройство дает возможность повысить точность выравнивания плотности тока по длине изделия в зоне обработки на 1% и обеспечить выравнивание плотности тока по ширине изделия. Поэтому его применение целесообразно

при ЭХО широкой ленты и других плоских изделий микронных толщин, а для ЭХО проволоки, плющенки, узкой ленты можно использовать устройство по [3].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанные методы и устройства выравнивания плотности тока в рабочих зонах ванн ЭХО позволили предложить и реализовать на практике технические решения по созданию автоматизированных комплексов ЭХО.

На основе разработанного устройства выравнивания плотности тока [3] создан высокопроизводительный автоматизированный комплекс ЭХО микроленты, позволяющий проводить любой процесс ЭХО: обезжиривание, комбинированную очистку, полирование ленты из различных марок сталей и сплавов в любых электролитах. Автоматизированный комплекс ЭХО принят в промышленную эксплуатацию и работает на Петербургском заводе прецизионных сплавов для ЭХО микроленты магнитной записи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сироткин С.Н., Воронина Т.А. и др. Разработка, создание и внедрение автоматизированной установки электрохимической очистки наружной и внутренней поверхности нержавеющей труб. Сборник тезисов докладов 10-й международной конференции «Покрываются и обработка поверхности». Москва, Россия, 26–28 марта 2013 г. с. 94.
2. Воронина Т.А. Электрохимическая обработка длинномерных изделий микронных толщин из прецизионных сплавов на железоникелевой основе. Автореф. дисс. канд. хим. наук. Екатеринбург, 1992.
3. Патент РФ № 871552. Устройство для электрохимической обработки длинномерных изделий микронных толщин. С.Н. Сироткин, В.Н. Багаев, Т.А. Воронина.

Поступила 07.07.14

## Summary

Several methods have been offered to provide a uniform distribution of the current density on the surface of the components along the length of the treatment zones. One of them, the method of equalization of the current density, is based upon the change of the form of electrodes according to a particular law. For this, the theoretical calculation of forms of electrodes for strong fields has been performed. Application of the offered methods allowed to develop the structures of electrodes for wire and tape, providing the equalization of the current density. However, the most universal method is the developed method of the equalization of the current density along the length of long components using the stabilization device. Realization of this method using this device allows: 1) To manufacture universal highly productive

installations for every process of electrochemical machining of long components; 2) To increase, significantly, the quality of processed items of various assortment from metals with different specific resistivity in any electrolytes regardless of their specific resistivity and its change during the work. Thus, the developed methods and devices of the equalization of the current density in the working areas of an electrochemical machining bath allowed to offer and implement in practice the technical solutions for creation of automated complexes of electrochemical machining. A highly productive automated complex of electrochemical machining of a microtape

was fabricated on the base of the developed device of the equalization of the current density that allows to perform any process of electrochemical machining: degreasing, combined cleaning, and polishing of the tape made of different grades of steel and alloys in any electrolytes. An automated complex of electrochemical machining has been put into commercial operation and is used at St. Petersburg Enterprise of precision alloys Ltd. for electrochemical machining of magnetic record microtapes.

*Keywords: electrochemical machining, current density, long component.*