

УДК 621.9.047.7

## Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий

Кандидаты техн. наук Ю. Г. Алексеев<sup>1)</sup>, А. Ю. Королёв<sup>1)</sup>,  
канд. техн. наук, доц. В. С. Нисс<sup>1)</sup>, инж. А. Э. Паршута<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** При производстве ряда ответственных трубчатых изделий предъявляются жесткие требования к качеству их внутренней поверхности. Известные методы обработки внутренних поверхностей труб включают в себя пескоструйную очистку, химическую очистку кислотными реагентами (щавелевая, муравьиная, сульфаминовая, ортофосфорная кислоты) и электрохимическое полирование. Недостатками химического метода являются неравномерность очистки, большой съём металла, ограниченное количество применений реагентов, сложный подбор химического состава и концентрации реагентов, сложная и экологически вредная утилизация отработанных реактивов, высокая стоимость химических реагентов. Недостатки пескоструйной очистки – низкая производительность при высоких затратах, а также вред, наносимый персоналу из-за высокой дисперсности абразивной пыли. К недостаткам электрохимического полирования относятся низкая производительность обработки, поскольку подача больших токов из-за рассеивающей способности электролита вдали от зоны основного действия электрода затруднена, ограниченная длина обрабатываемой полости из-за нагрева гибких токоподводов при рабочих плотностях тока, применение агрессивных дорогостоящих электролитов и высокие затраты на их утилизацию. Разработан новый метод полирования и очистки внутренних поверхностей трубчатых изделий на основе электролитно-плазменной обработки, обеспечивающий по сравнению с существующими методами качественную обработку с высокой интенсивностью, с применением нетоксичных, экологически безопасных и дешевых электролитов. Приведены результаты исследования влияния технологических особенностей процесса электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий – ширины щелевого сопла, расхода и скорости электролита – на устойчивость парогазовой оболочки, плотность тока и производительность. По итогам исследований установлены режимы, обеспечивающие стабильность и высокую производительность в процессе электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий.

**Ключевые слова:** электролитно-плазменная обработка, трубчатые изделия, полирование и очистка, внутренняя поверхность

**Для цитирования:** Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 1. С. 61–68

## Electrolytic-Plasma Treatment of Inner Surface of Tubular Products

Yu. G. Alekseev<sup>1)</sup>, A. Yu. Korolyov<sup>1)</sup>, V. S. Niss<sup>1)</sup>, A. E. Parshuta<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** While manufacturing a number of important tubular products stringent requirements have been imposed on quality of their inner surfaces. The well-known methods for inner surface treatment of pipes include sandblasting, chemical cleaning with acid reagents (oxalic, formic, sulfamic, orthophosphoric acids) and electrochemical polishing. Disadvantages of the chemical method are cleaning-up irregularities, high metal removal, limited number of reagent application, complicated selection of reagent chemical composition and concentration, complicated and environmentally harmful recycling of waste chemicals, high cost of reagents. Low productivity at a high cost, as well as hazardous impact on personnel due to high

### Адрес для переписки

Королёв Александр Юрьевич  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 24,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-35-41  
korolyov@metolit.by

### Address for correspondence

Korolyov Aleksander Yu.  
Belarusian National Technical University  
24 Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-35-41  
korolyov@metolit.by

dispersion of abrasive dust are considered as disadvantages of sandblasting. Electrochemical polishing is characterized by the following disadvantages: low processing productivity because supply of high currents is rather difficult due to electrolyte scattering capacity away from the main electrode action zone, limited length of the cavity to be treated due to heating of flexible current leads at operating current densities, application of expensive aggressive electrolytes and high costs of their recycling. A new method for polishing and cleaning of inner surfaces of tubular products based on electrolyte-plasma treatment has been developed. In comparison with the existing methods the proposed methods ensures quality processing with high intensity while applying non-toxic, environmentally friendly and cheap electrolytes. The paper presents results of investigations on technological specific features of electrolyte-plasma treatment for inner surfaces of tubular products: influence of slotted nozzle width, electrolyte flow and rate on stability of gas-vapor blanket, current density and productivity. Results of the research have made it possible to determine modes that provide stability and high productivity in the process of electrolyte-plasma treatment of inner surfaces of tubular products.

**Keywords:** electrolyte-plasma treatment, tubular products, polishing and cleaning, inner surface

**For citation:** Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuta A. E. (2016) Electrolytic-Plasma Treatment of Inner Surface of Tubular Products. *Science & Technique*. 15 (1), 61–68 (in Russian)

## Введение

Известные методы обработки внутренних поверхностей труб включают в себя пескоструйную очистку, химическую очистку кислотными реагентами (щавелевая, муравьиная, сульфаминовая, ортофосфорная кислоты) и электрохимическое полирование [1–3]. Недостатками химического метода являются неравномерность очистки, большой съем металла, ограниченное количество применений реагентов, сложный подбор химического состава и концентрации реагентов, сложная и экологически вредная утилизация отработанных реактивов, высокая стоимость химических реагентов. Недостатки пескоструйной очистки – низкая производительность при высоких затратах, а также вред, наносимый персоналу из-за высокой дисперсности абразивной пыли. К недостаткам электрохимического полирования относятся низкая производительность обработки, поскольку подача больших токов из-за рассеивающей способности электролита вдали от зоны основного действия электрода затруднена, ограниченная длина обрабатываемой полости из-за нагрева гибких токоподводов при рабочих плотностях тока, применение агрессивных дорогостоящих электролитов и высокие затраты на их утилизацию [4, 5].

Предложен новый метод полирования и очистки внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий на основе электролитно-плазменной обработки, обеспечивающий по сравнению с существующими методами качественную обработку с высокой интенсивностью, с применением нетоксичных, экологически безопасных и дешевых электролитов.

Реализация метода становится возможной при использовании перемещаемого внутри обрабатываемой трубы электрода-инструмента, являющегося катодом. В корпусе электрода-инструмента имеется щелевое сопло, через которое электролит подается на внутреннюю поверхность трубы [6, 7]. Исследовали влияние технологических особенностей процесса электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий – ширины щелевого сопла, расхода и скорости электролита – на устойчивость парогазовой оболочки, плотность тока и производительность в процессе электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий.

## Оборудование и методы

Для выполнения исследований использовали экспериментальную установку электролитно-плазменной обработки мощностью 25 кВт. Конструкция электрода-инструмента для электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий представлена на рис. 1. Образцами для исследований являлись отрезки труб из стали 12X18H10T с внутренним диаметром 26,5 мм. Зазор между электродом-инструментом и внутренней стенкой трубы составлял 0,75 мм. Ширина щелевого сопла электрода-инструмента изменялась в диапазоне от 0,5 до 2,0 мм с шагом 0,5 мм. В качестве электролита использовали 6%-й раствор сульфата аммония. Температура электролита составляла 75 °С, рабочее напряжение 300 В. Силу тока определяли с помощью токовых клещей UNIT-203. Массу образцов до и после

обработки измеряли на аналитических весах Ohaus Pioneer 214-PA (дискретность 0,0001 г).



Рис. 1. Электрод-инструмент для электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий

Fig. 1. The electrode-tool for electrolyte-plasma treatment of the inner surfaces of tubular products

Скорость истечения электролита из электрода-инструмента рассчитывали по формуле согласно [8]

$$v = \frac{Q}{\omega}, \quad (1)$$

где  $Q$  – расход потока, м<sup>3</sup>/с;  $\omega$  – живое сечение, м<sup>2</sup>.

Расход электролита измеряли весовым методом.

### Результаты исследований

Изучение влияния расхода электролита через электрод-инструмент на силу тока в цепи «электролит – анод» показало, что при любом значении ширины щелевого сопла с увеличением расхода наблюдается прямо пропорциональное увеличение силы тока (рис. 2). Причем зависимости для различных значений ширины щелевого сопла практически сливаются в одну линию и отличаются лишь величиной достигаемой силы тока.

При изменении расхода электролита и соответственно силы тока существенным образом меняется характер процесса обработки. При этом в зависимости от величины расхода отмечались две характерные стадии процесса:

1) стадия существования устойчивой парогазовой оболочки (устойчивое пленочное кипение);

2) стадия срыва парогазовой оболочки с интенсивным пузырением и разбрызгиванием электролита, характеризующаяся также импульсным повышением тока.

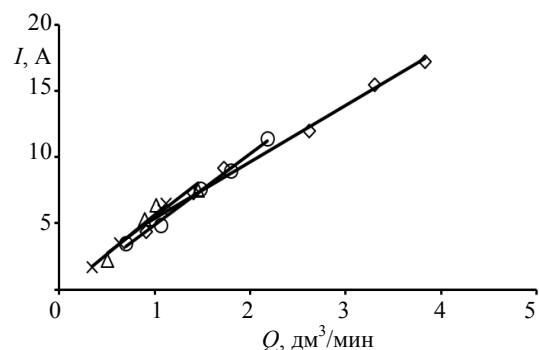


Рис. 2. Влияние расхода электролита через электрод-инструмент на силу тока в цепи «электролит – анод» при различных значениях ширины щелевого сопла  $\delta$ , мм:  
○ – 0,5; ◇ – 1,0; Δ – 1,5; × – 2,0

Fig. 2. Effect of flow of electrolyte through the electrode-tool on the current in “electrolyte – anode” circuit at different widths of slit nozzle  $\delta$ , mm:  
○ – 0,5; ◇ – 1,0; Δ – 1,5; × – 2,0

Модель гидравлической системы при обработке внутренних поверхностей трубчатых изделий представлена на рис. 3. Первой стадии соответствуют низкие значения силы тока при небольшом расходе электролита (рис. 3а). При этом зазор между обрабатываемой трубой и частью электрода-инструмента выше щелевого сопла остается свободным от электролита. Это позволяет образующейся парогазовой смеси удаляться из зоны обработки, что способствует нормальному протеканию процесса электролитно-плазменной обработки. С постепенным увеличением расхода (скорости) электролита возникает вертикальный фонтан выше щелевого сопла (рис. 3б), который уже создает некоторые трудности для свободного выхода парогазовой смеси из зоны обработки. Такому состоянию соответствует переход от первой ко второй стадии обработки. Дальнейшее увеличение расхода приводит к полному заполнению электролитом зазора между электродом-инструментом и внутренней поверхностью трубы (рис. 3с). При этом наблюдается разбрызгивание электролита и существенное импульсное повышение тока (стадия срыва парогазовой оболочки – вторая стадия процесса). Этой стадии соответствуют максимальные значения силы тока.

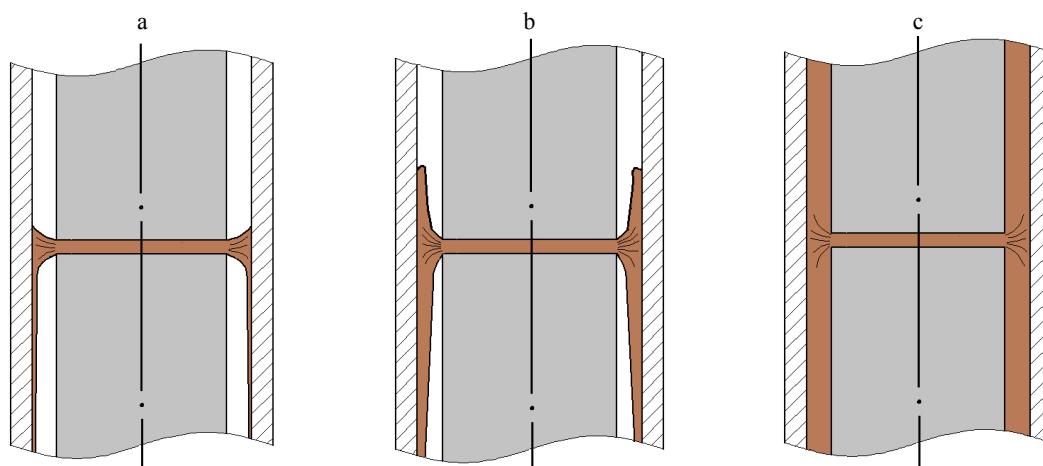


Рис. 3. Модель гидравлической системы при обработке внутренних поверхностей трубчатых изделий  
 Fig. 3. Model of hydraulic system for treatment of the inner surfaces of tubular products

Зависимости, характеризующие влияние скорости истечения электролита из электрода-инструмента на силу тока в цепи «электролит – анод» при различных значениях ширины щелевого сопла, представлены на рис. 4.

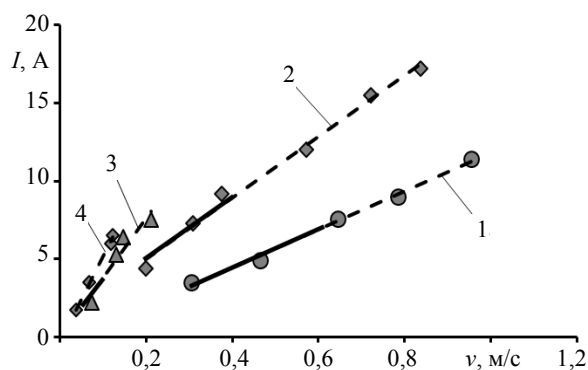


Рис. 4. Влияние скорости истечения электролита из электрода-инструмента на силу тока в цепи «электролит – анод» при различных значениях ширины щелевого сопла  $\delta$ , мм: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 1,5; 4 – 2,0

Fig. 4. Effect of flow rate of the electrolyte from the electrode-tool on the current in the “electrolyte – anode” circuit at different widths of the slit nozzle  $\delta$ , mm: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 1,5; 4 – 2,0

В отличие от зависимостей рис. 2, приведенные на рис. 4 графики позволяют наглядно оценить диапазоны параметров, обеспечивающих возможность выполнения обработки внутренних поверхностей. На рис. 4 сплошными линиями отмечены участки, соответствующие стадии существования устойчивой парогововой оболочки, т. е. рабочий режим; штриховой ли-

нией – участки, соответствующие второй стадии (срыва парогововой оболочки), при которой обработка затруднена. Из рис. 4 видно, что достаточно широкий рабочий диапазон скорости электролита обеспечивается при ширине щелевого сопла 0,5 и 1,0 мм. При этом максимальная сила тока достигается при  $\delta = 1,0$  мм. Нормальное протекание процесса при ширине щелевого сопла 1,5 и 2,0 мм невозможно.

Для оценки влияния силы тока в цепи «электролит – анод» на производительность процесса обработки внутренних поверхностей устанавливали изменение массы образцов до и после обработки при различных значениях скорости истечения электролита из электрода-инструмента соответственно при различных значениях силы тока. Продолжительность обработки каждого образца составляла 3 мин. Поскольку при ширине щелевого сопла 1,5 и 2,0 мм не обеспечивается стабильность процесса обработки, исследования выполняли при значениях ширины 0,5 и 1,0 мм. Экспериментальные зависимости скорости массового съема от силы тока в цепи «электролит – анод» представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что зависимость изменения массы образца от силы тока имеет линейный характер. Таким образом выполняется закон Фарадея [9], согласно которому объем (или масса) металла  $\Delta V$ , удаленного с заготовки, прямо пропорционален (пропорциональна) электрическому заряду, прошедшему через электролит:

$$\Delta V = k_v \eta_a I t, \quad (2)$$

где  $k_v$  – объемный электрохимический эквивалент вещества (для коррозионностойких аустенитных сталей составляет  $2,16 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/(\text{А} \cdot \text{мин})$ );  $\eta_a$  – коэффициент выхода по току;  $I$  – сила тока, проходящего через электролит, А;  $t$  – продолжительность обработки, мин.

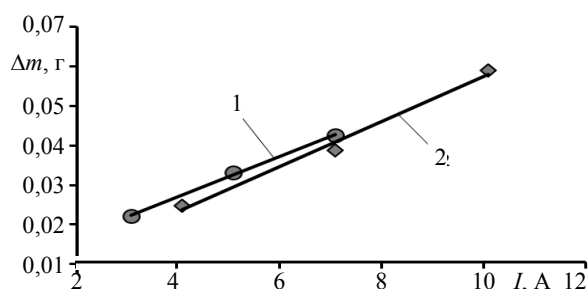


Рис. 5. Влияние силы тока в цепи «электролит – анод» на изменение массы образца в процессе обработки внутренних поверхностей: 1 –  $\delta = 0,5$  мм; 2 – 1,0 мм

Fig. 5. Effect of the current in “electrolyte – anode” circuit on the mass change of the sample during treatment the inner surfaces: 1 –  $\delta = 0,5$  mm; 2 – 1,0 mm

Для определения плотности тока в процессе обработки при различных значениях скорости истечения электролита из электрода-инструмента (соответственно при различных значениях силы тока) необходимо знать эффективную площадь обработки. Эффективную площадь обработки определяли по ширине зоны обработки. В качестве примера на рис. 6 представлено изображение внутренней поверхности образцов после обработки с неподвижным электродом-инструментом продолжительностью 3 мин при ширине щелевого сопла  $\delta = 1,0$  мм. Цифрам соответствуют значения силы тока, при которых выполняли обработку образцов.

Из рис. 6 визуально можно установить, что ширина зоны обработки изменяется в зависимости от силы тока (скорости потока). Поскольку зона обработки имеет некоторую неравномерность по цилиндрической образующей, то для более точной количественной оценки измеряли ее ширину в десяти точках. Среднее значение по десяти точкам принимали за ширину зоны обработки.

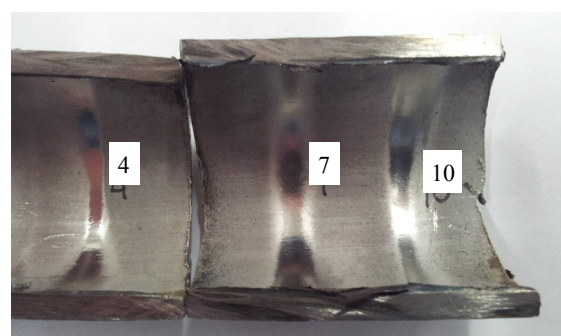


Рис. 6. Изменение ширины зоны обработки при различных значениях силы тока (скорости потока) при ширине щелевого сопла 1,0 мм

Fig. 6. Changing the width of the treatment area for different values of current (flow rate) with a width of the slit nozzle 1,0 mm

На основании полученных данных построены зависимости, характеризующие изменение ширины зоны обработки от скорости электролита (рис. 7). Видно, что зависимости имеют характерный максимум, связанный, вероятно, с гидравлическими особенностями прохождения потоков электролита в зоне обработки.

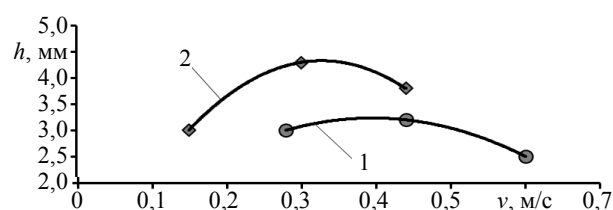


Рис. 7. Влияние скорости электролита на изменение ширины зоны обработки: 1 –  $\delta = 0,5$  мм; 2 – 1,0 мм

Fig. 7. Effect of electrolyte rate on change the width of the treatment area: 1 –  $\delta = 0,5$  mm; 2 – 1,0 mm

Зависимости плотности тока от скорости истечения потока электролита при различных значениях ширины щелевого сопла представлены на рис. 8. Плотность тока определяли как отношение силы тока, при которой выполнялась обработка образцов, к ширине зоны обработки. Представленные зависимости имеют параболический характер. Плотность тока повышается с увеличением скорости истечения электролита из электрода-инструмента.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 7 и 8, показывает, что при щелевом сопле

с  $\delta = 1,0$  мм обеспечивается большая по сравнению с  $\delta = 0,5$  мм ширина зоны обработки. Но поскольку меньшим значениям  $\delta$  соответствуют меньшие рабочие диапазоны силы тока, то для  $\delta = 0,5$  и  $1,0$  мм обеспечиваются примерно одинаковые значения величины плотности тока.

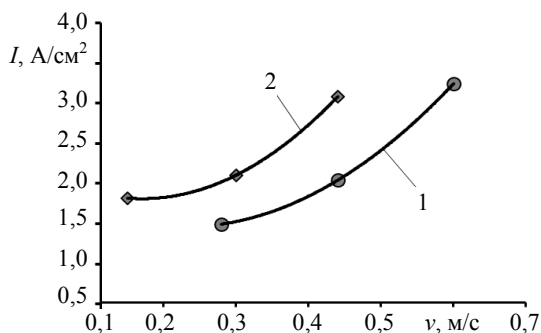


Рис. 8. Влияние скорости электролита на изменение плотности тока при обработке внутренних поверхностей: 1 –  $\delta = 0,5$  мм; 2 –  $1,0$  мм

Fig. 8. Effect of the electrolyte rate on change the current density in the treatment of the inner surfaces: 1 –  $\delta = 0,5$  mm; 2 –  $1,0$  mm

Для оценки скорости съема металла при обработке внутренних поверхностей трубчатых изделий целесообразно использовать величину массовой съема с единицы поверхности за единицу времени  $\Delta G$  (массовая скорость съема). Расчет массовой скорости съема проводили по полученным ранее значениям изменения массы образцов и установленной площади зоны обработки. Продолжительность обработки составляла 3 мин. Зависимости, характеризующие влияние плотности тока на изменение массовой скорости съема в процессе обработки внутренних поверхностей при ширине щелевого сопла  $0,5$  и  $1,0$  мм, представлены на рис. 9 (зависимости 1 и 2). Зависимости имеют линейный характер.

Для сравнения на графике рис. 9 приведена аналогичная зависимость изменения массовой скорости съема от плотности тока (зависимость 3), полученная в процессе классической электролитно-плазменной обработки наружной поверхности плоского образца при напряжении  $300$  В и температуре электролита от  $60$

до  $80$  °С [10]. Классическая обработка наружной поверхности в электролите с низкой температурой обеспечила достаточно высокую плотность тока – от  $0,605$  до  $0,305$  А/см<sup>2</sup> (рабочая температура обычно превышает  $90$  °С, а плотность тока  $0,10$ – $0,15$  А/см<sup>2</sup>). Однако, как видно из зависимостей, даже такие значения плотности тока в разы меньше значений, достигаемых при обработке внутренних поверхностей трубчатых изделий. Соответственно и производительность процесса обработки внутренних поверхностей существенно больше производительности при классической обработке наружных поверхностей в неподвижном электролите.

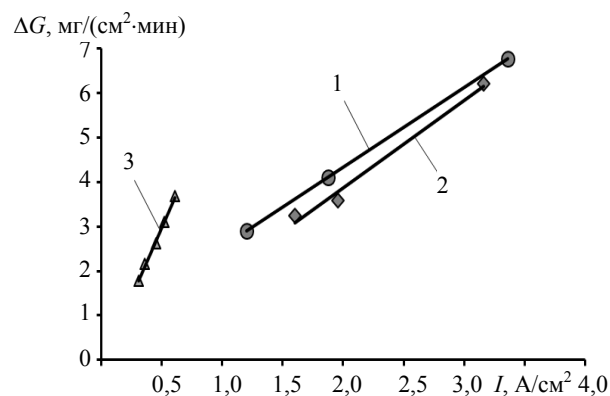


Рис. 9. Влияние плотности тока на изменение массовой скорости съема при обработке поверхностей: 1 –  $\delta = 0,5$  мм; 2 –  $1,0$  мм; 3 – обработка наружной поверхности плоского образца

Fig. 9. Effect of current density on the change of mass removal rate in surfaces treatment: 1 –  $\delta = 0,5$  mm; 2 –  $1,0$  mm; 3 – flat specimen external surface treatment

Хотя зависимость 3 также имеет линейный характер, она отличается от зависимостей 1 и 2 угловым коэффициентом. Зависимости для обработки внутренних поверхностей являются более пологими. Как показывает анализ формулы (2), причиной этого может быть только более низкий коэффициент выхода по току  $\eta_a$  при обработке внутренних поверхностей потоками электролита по сравнению с классической обработкой наружных поверхностей в неподвижном электролите.

Результат электролитно-плазменной обработки внутренней поверхности трубы диамет-

ром 26,5 мм из стали 12X18H10T представлен на рис. 10.

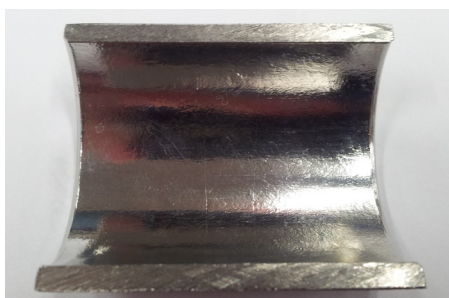


Рис. 10. Результат электролитно-плазменной обработки внутренней поверхности трубы диаметром 26,5 мм из стали 12X18H10T

Fig. 10. The result of electrolyte-plasma treatment of the inner surface of the tube with a diameter of 26,5 mm of steel 12Cr18Ni10Ti

### ВЫВОДЫ

1. В процессе электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий при различных значениях ширины щелевого сопла в электроде-инструменте (от 0,5 до 2,0 мм) с увеличением расхода электролита наблюдается прямо пропорциональное увеличение силы тока. Установлено, что достаточно широкий рабочий диапазон скорости электролита обеспечивается при ширине щелевого сопла 0,5 и 1,0 мм. При этом максимальная сила тока 9,0 А достигается при ширине 1,0 мм. Нормальное протекание процесса при ширине щелевого сопла 1,5 и 2,0 мм невозможно из-за неустойчивости парогововой оболочки.

2. Плотность тока и производительность электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий повышаются с увеличением скорости истечения электролита из электрода-инструмента. Так, при использовании электрода-инструмента с шириной щелевого сопла 1,0 мм с повышением скорости истечения электролита от 0,15 до 0,44 м/с плотность тока увеличивается с 1,60 до 3,16 А/см<sup>2</sup>.

3. Разработанная технология при условии обеспечения токоподвода и подачи электролита к электроду-инструменту, перемещаемому

внутри трубы, обеспечивает возможность электролитно-плазменного полирования и очистки внутренних поверхностей трубчатых изделий большой длины (до 10 м) с различной формой профиля (круг, квадрат, прямоугольник). При этом необходимым условием является регулярность профиля трубы по всей длине.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Химические очистки теплоэнергетического оборудования / под общ. ред. Т. Х. Маргуловой. М.: Энергия, 1969. 223 с.
2. Пяндрина, Т. Н. Электрохимическая обработка металлов / Т. Н. Пяндрина. М.: Машгиз, 1961. 70 с.
3. Грилихес, С. Я. Электрохимическое и химическое полирование: теория и практика. Влияние на свойства металлов / С. Я. Грилихес. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1987. 232 с.
4. Мельников, П. С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении / П. С. Мельников. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1991. 384 с.
5. Практикум по прикладной электрохимии // Н. Г. Бахчисарайцыян [и др.] / под ред. В. Н. Варыпаева, В. Н. Кудрявцева. Л.: Химия, 1990. 304 с.
6. Исследование процесса полирования и очистки внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий с применением электролитно-плазменной обработки / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докл. 9-го Междунар. симпозиума, Минск, 8–10 апреля 2015 г.: в 2 ч. Минск: Беларус. навука, 2015. Ч. 2. С. 27–38.
7. Разработка процессов электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий / В. С. Нисс [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 мая 2014 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. Ф. Ильюшенко (гл. ред.) [и др.]. Минск: Беларус. навука, 2014. С. 296–297.
8. Кононов, А. А. Гидравлические и пневматические машины / А. А. Кононов, Д. Ю. Кобзов, С. М. Ермашенок. Братск: Братский гос. ун-т, 2015. 200 с.
9. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан [и др.]; под общ. ред. В. А. Волосатова. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1988. 719 с.
10. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю. Г. Алексеев [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. Минск: БНТУ, 2015. 203 с.

Поступила 02.07.2015

Подписана в печать 25.09.2015

Опубликована онлайн 22.01.2016

REFERENCES

1. Mamet A. P., Diatlova N. M., Balezin S. A., Glikina F. B., Bulavina E. S., Shadrina N. I., Margulova T. Kh., Iakovleva V. S., Ialova A. Ia. (1969) *Chemical Cleaning of Heat Power Equipment*. Moscow, Energiya. 223 p. (in Russian).
2. Pyandrina T. N. (1961) *Electrochemical Treatment of Metals*. Moscow, Mashgiz. 70 p. (in Russian).
3. Grilikhes S. Ya. (1987) *Electrochemical and Chemical Polishing: Theory and Practice. Effect on Metal Properties*. 2<sup>nd</sup> ed. Leningrad, Mashinostroenie, Leningrad Sub-Branch. 232 p. (in Russian).
4. Melnikov P. S. (1991) *Reference Book on Electroplating in Mechanical Engineering*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Mashinostroenie. 384 p. (in Russian).
5. Bakhchisaraitisian N. G., Borisoglebsky Iu. V., Burkat G. K., Varypaev V. N., Golovchanskaia R. G., Kokarev G. A., Kruglikov S. S., Nachinov G. N., Novikov V. T., Ravdel B. A., Rumiantsev E. M., Tikhonov K. I., Tiutina K. M., Tsupak T. E., Shoshina I. A. (1990) *Practical Work on Applied Electrochemistry*. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, Khimiya. 304 p. (in Russian).
6. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Parshuta A. E., Niss V. S. (2015) Investigation of Polishing Process and Cleaning of Internal Surfaces of Long Tubular Products While Applying Electrolyte-Plasma Treatment. *Surface Engineering. New Powder Composite Materials. Welding: Book of Reports, 9<sup>th</sup> International Symposium, Minsk, April 8–10, 2015*. Minsk, Belaruskaya Navuka, 27–38 (in Russian).
7. Niss V. S., Alekseev Yu. G., Parshuta A. E., Korolyov A. Yu. (2014) Development of Processes for Electrolyte-Plasma Treatment of Internal Surfaces of Long Tubular Products. *New Materials and Technologies: Powder Metallurgy, Composite Materials, Protective Coatings, Welding: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference, Minsk, May 28–30, 2014*. Minsk: Belaruskaya Navuka, 296–297 (in Russian).
8. Kononov A. A., Kobzov D. Yu., Ermashonok S. M. (2015) *Hydraulic and Pneumatic Machines*. Bratsk: Bratsk State University. 200 p. (in Russian).
9. Amitan G. L., Baisupov I. A., Baron Iu. M., Bliashko Ia. I., Vagin V. A., Volosatov V. A., Kratysh G. S., Lubianitskii G. D., Nemilov E. F., Popov N. M., Pugachev S. I., Ushomirskaya L. A., Finkelshtein A. Ia., Shelestov A. M. (1988) *Reference Book on Electrochemical and Electro-Physical Treatment Methods*. Leningrad, Mashinostroenie. 719 p.
10. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Minchenia V. T., Niss V. S., Parshuta A. E., Khroustalev B. M. (2015) *Combined Technology for Manufacturing Flexible Ultrasonic Tool-Con-Centrators*. Minsk: BNTU. 203 p.

Received: 02.07.2015

Accepted: 25.09.2015

Published online: 22.01.2016