

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что использование импульсных режимов обработки обеспечивает снижение общего съема металла по сравнению с обработкой на постоянном токе в 2–2,2 раза. При этом уменьшение удельных затрат энергии на снижение шероховатости поверхности достигает 4,7 раза. Рекомендуемая продолжительность обработки составляет 5–6 мин, поскольку дальнейшая обработка не приводит к значимому улучшению характеристик поверхности.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛИРОВАНИЯ И ОЧИСТКИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛИННОМЕРНЫХ ТРУБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЛИТНО- ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Ю. Г. Алексеев¹, А. Ю. Королев¹, А. Э. Паршута¹, В. С. Нисс²

*¹Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»,
Минск, Беларусь, тел./факс: +375 17 292-25-98,
e-mail: korolyov@metolit.by*

*²Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь, тел.: +375 17 296-67-22, e-mail: niss@metolit.by*

Металлические трубы имеют множество различных функций в широком спектре промышленных применений, а очистка их внутренних поверхностей является ключевым фактором, обеспечивающим надежную эксплуатацию оборудования, в состав которого они входят. Например, очистка и полирование внутренних поверхностей труб при производстве оборудования молочной, кисломолочной, мясной, рыбной, консервной и хлебопекарной продукции производится с целью повышения коррозионной стойкости и исключения микробиологического влияния на продукты. Обработка внутренних поверхностей труб в теплообменных системах выполняется с целью снижения коррозии, износа, эрозии, изъязвления, а также для удаления

загрязнений, оказывающих существенное влияние на эффективность теплообменного устройства.

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 съем металла, ограниченное количество применений реагентов, сложный подбор химического состава и концентрации реагентов, сложная и экологически вредная утилизация отработанных реактивов, высокая стоимость химических реагентов. Недостатками пескоструйной очистки являются низкая производительность при высоких затратах, а также вред, наносимый персоналу, из-за высокой дисперсности абразивной пыли. Недостатком электрохимического полирования является 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.

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. В данной работе приводятся результаты исследования технологических особенностей процесса электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий.

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.

В работе исследовалось влияние технологических особенностей процесса электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий.

Установим влияние ширины щелевого сопла, а также расхода и скорости электролита на устойчивость парогазовой оболочки и плотность тока в процессе электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей. 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 изменялась в диапазоне от 0,5 до 2,0 мм с шагом 0,5 мм. В качестве электролита использовался 6%-ный раствор сульфата аммония. Температура электролита составляла 75 °С. Рабочее напряжение – 300 В. Сила тока определялась с помощью токовых клещей UNIT-203. Расход электролита измерялся весовым методом. Скорость электролита рассчитывалась по формуле [1]:

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

где Q – расход потока, м³/с; ω – живое сечение, м².

Исследования влияния расхода электролита через электрод-инструмент на силу тока в цепи электролит–анод показали, что при любом значении ширины щелевого сопла с увеличением расхода наблюдается прямо пропорциональное увеличение силы тока (рис. 1). 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.

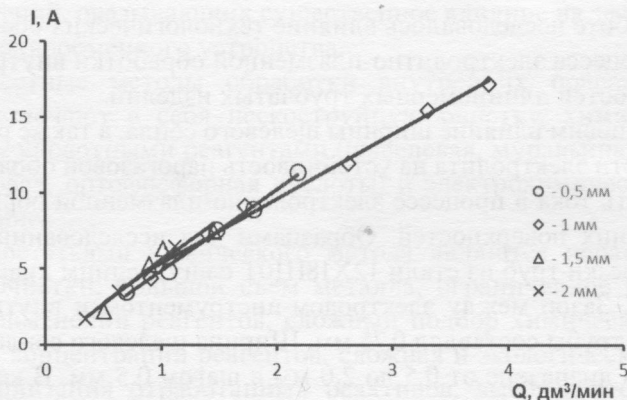


Рис. 1. Влияние расхода электролита через электрод-инструмент на силу тока в цепи электролит-анод при различных значениях ширины щелевого сопла δ

На рис. 2 представлена модель гидравлической системы при обработке внутренних поверхностей трубчатых изделий. Первой стадии соответствуют низкие значения силы тока при небольшом расходе электролита (рис. 2, а). 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. 2, б), 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. 2, в). При этом наблюдается разбрызгивание электролита и существенное импульсное повышение тока (стадия срыва парогазовой оболочки – вторая стадия процесса). Этой стадии соответствуют максимальные значения силы тока.

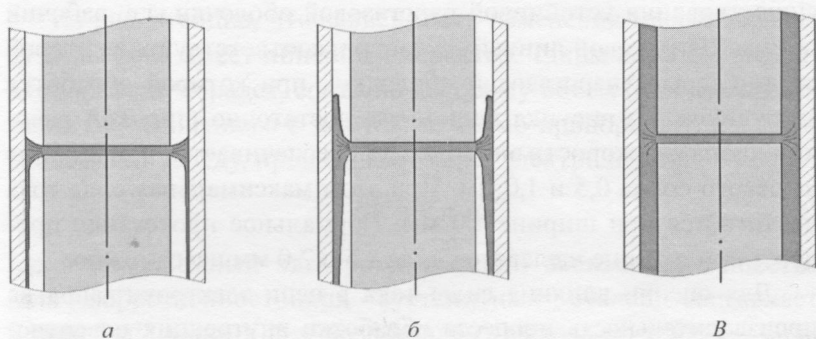


Рис. 2. Модель гидравлической системы при обработке внутренних поверхностей трубчатых изделий

На рис. 3 представлены зависимости, характеризующие влияние скорости истечения электролита из электрода-инструмента на силу тока в цепи электролит-анод при различных значениях ширины щелевого сопла. В отличие от зависимостей на рис. 1 представленные зависимости позволяют наглядно оценить диапазоны параметров, обеспечивающих возможность выполнения обработки внутренних поверхностей. На зависимостях сплошной линией отмечены участки, соответствующие стадии

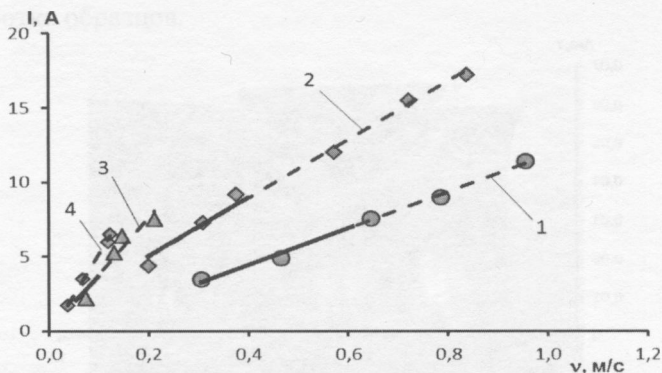


Рис. 3. Влияние скорости истечения электролита из электрода-инструмента на силу тока в цепи электролит-анод при различных значениях ширины щелевого сопла δ : 1 - $\delta = 0,5$ мм; 2 - $\delta = 1,0$ мм; 3 - $\delta = 1,5$ мм; 4 - $\delta = 2,0$ мм

существования устойчивой парогазовой оболочки, т.е. рабочий режим. Штриховой линией – участки, соответствующие второй стадии (срыва парогазовой оболочки), при которой обработка затруднена. Из рисунка 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 ширине 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 установим изменение массы образцов до и после обработки при различных значениях скорости истечения электролита из электрода инструмента, соответственно, при различных значениях силы тока. Температура электролита составляла 75 °С. Продолжительность обработки каждого образца – 3 мин. Масса образцов до и после обработки измерялась с помощью аналитических весов Ohaus Pioneer 214-PA (дискретность 0,0001 г). Поскольку при ширине щелевого сопла 1,5 и 2,0 мм не обеспечивается стабильность процесса обработки, то данные и последующие исследования будут выполняться при значениях ширины 0,5 и 1,0 мм. Экспериментальные зависимости скорости массового съема от силы тока в цепи электролит-анод представлены на рис. 4.

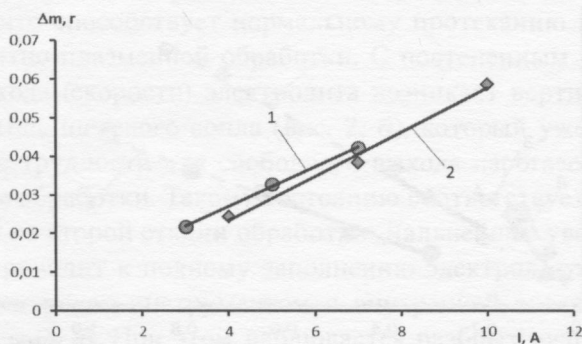


Рис. 4. Влияние силы тока в цепи электролит-анод на изменение массы образца в процессе обработки внутренних поверхностей: 1 – $\delta = 0,5$ мм; 2 – $\delta = 1,0$ мм

Из рис. 4 видно, что зависимость изменения массы образца от силы тока имеет линейный характер. Таким образом выполняется закон Фарадея, согласно которому объем (или масса) металла ΔV , удаленного с заготовки, прямо пропорционален электрическому заряду, прошедшему через электролит [2]:

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

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

Для определения плотности тока при обработке при различных значениях скорости истечения электролита из электрода-инструмента (соответственно при различных значениях силы тока) необходимо знать эффективную площадь обработки. Эффективную площадь обработки можно определить по ширине зоны обработки. На рис. 5 в качестве примера представлено изображение внутренней поверхности образцов после обработки с неподвижным электродом-инструментом продолжительностью 3 мин при ширине щелевого сопла $\delta = 1,0 \text{ мм}$. Цифрам соответствуют значения силы тока, при которых выполнялась обработка образцов.

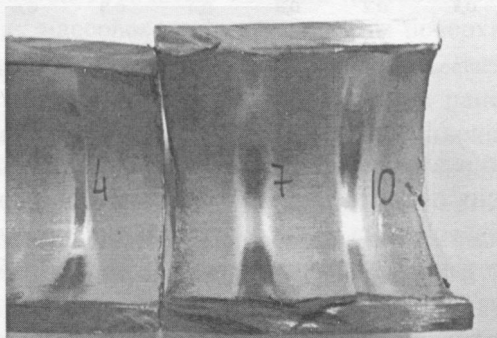


Рис. 5. Изменение ширины зоны обработки при различных значениях силы тока (скорости потока) при ширине щелевого сопла 1,0 мм

Из рис. 5 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 выполнялось измерение ее ширины в десяти точках. Среднее значение по десяти точкам принималось за ширину зоны обработки. На основании полученных данных построены зависимости, характеризующие изменение ширины зоны обработки от скорости электролита (рис. 6). Видно, что зависимости имеют характерный максимум, связанный, вероятно, с гидравлическими особенностями прохождения потоков электролита в зоне обработки.

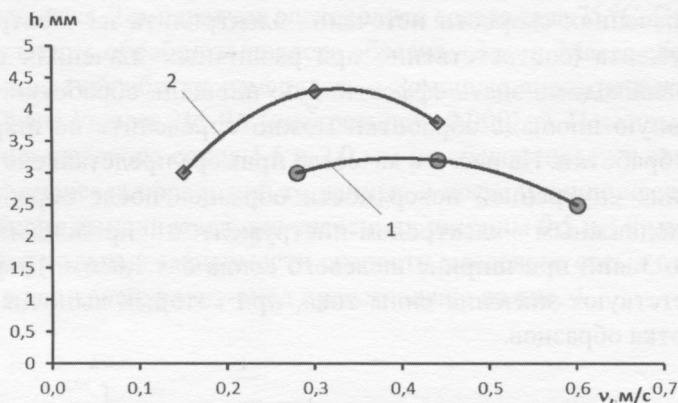


Рис. 6. Влияние скорости электролита на изменение ширины зоны обработки:
 1 — $\delta = 0,5$ мм; 2 — $\delta = 1,0$ мм

На рис. 7 представлены зависимости плотности тока от скорости истечения потока электролита при различных значениях ширины щелевого сопла. Плотность тока определялась 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.

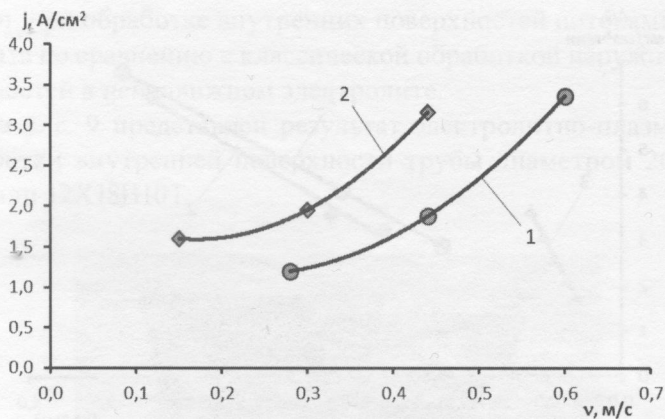


Рис. 7. Влияние скорости электролита на изменение плотности тока при обработке внутренних поверхностей: 1 – $\delta = 0,5$ мм; 2 – $\delta = 1,0$ мм

Анализ зависимостей, представленных на рис. 6 и 7, 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 δ соответствуют меньшие рабочие диапазоны силы тока, то для $\delta = 0,5$ мм и $\delta = 1,0$ мм обеспечиваются примерно одинаковые значения величины плотности тока.

Для оценки скорости съема металла при обработке внутренних поверхностей трубчатых изделий целесообразно использовать величину массового съема с единицы поверхности за единицу времени ΔG (скорость массового съема). Расчет скорости массового съема проводился 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 при обработке внутренних поверхностей при ширине щелевого сопла 0,5 и 1,0 мм, представлены на рис. 8 (зависимости 1 и 2). Зависимости имеют линейный характер.

Для сравнения на графике (рис. 8) приведена аналогичная зависимость изменения массовой скорости съема от плотно-

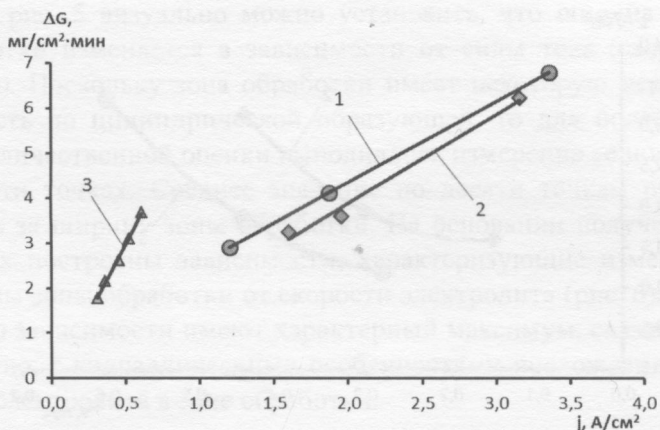


Рис. 8. Влияние плотности тока на изменение массовой скорости съема при обработке поверхностей: 1 – $\delta = 0,5$ мм; 2 – $\delta = 1,0$ мм; 3 – обработка наружной поверхности плоского образца

сти 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 [3]. Классическая обработка наружной поверхности в электролите с низкой температурой обеспечила достаточно высокую плотность тока – от 0,605 до 0,305 А/см² (рабочая температура обычно превышает 90 °С, а плотность тока 0,1–0,15 А/см²). Однако, как видно из зависимостей, даже такие значения плотности тока в разы ниже значений, достигаемых при обработке внутренних поверхностей трубчатых изделий. Соответственно и производительность процесса обработки внутренних поверхностей существенно выше производительности при классической обработке наружных поверхностей в неподвижном электролите.

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 η_a при обработке внутренних поверхностей потоками электролита по сравнению с классической обработкой наружных поверхностей в неподвижном электролите.

На рис. 9 представлен результат электролитно-плазменной обработки внутренней поверхности трубы диаметром 26,5 мм из стали 12X18H10T.

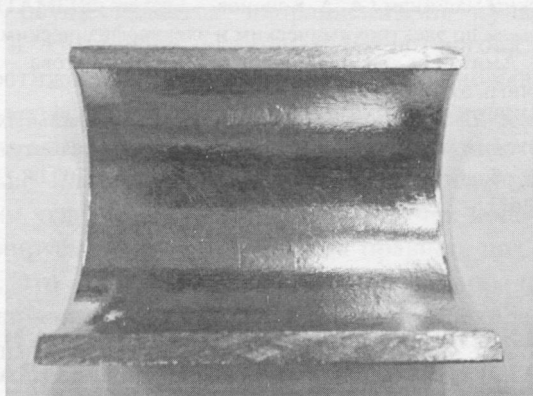


Рис. 9. Результат электролитно-плазменной обработки внутренней поверхности трубы диаметром 26,5 мм из стали 12X18H10T

Заключение. 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 А достигается при ширине 1,0 мм. Нормальное протекание процесса при ширине щелевого сопла 1,5 и 2,0 мм невозможно из-за неустойчивости парогазовой 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 от 1,6 до 3,16 А/см².

Литература

1. Кононов, А. А. Курс лекций по основам гидравлики, гидравлическим и пневматическим машинам / А. А. Кононов. – Братск: ФИЗМАТЛИТ, 2010.
2. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г. Л. Амитан [и др.]; под общ. ред. В. А. Волосатова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 719 с.
3. Королев, А. Ю. Технология получения сложнопрофильных длинномерных ультразвуковых медицинских волноводов малого диаметра электролитно-плазменной обработкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / А. Ю. Королев. – Минск, 2013. – 229 с.

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЕЙ 38Х2МЮА И 40Х

А. Н. Дробов, А. Н. Моисеенко, О. И. Назарова

*Физико-технический институт, Минск, Беларусь,
тел.: +375 17 263-51-25, факс: +375 17 263-59-20,
e-mail: drobovandreya@yandex.ru*

Введение. Обработка материалов интенсивными потоками плазмы широко используется для улучшения физических и химических свойств поверхности материалов – механической прочности, износо- и коррозионной стойкости. Результат их обработки зависит от параметров плазменного потока и длительности воздействия, исходного состояния поверхности обрабатываемого материала и др. Во время ионного азотирования (ИА) при ионной бомбардировке может происходить интенсивное распыление поверхности подложки. В случае использования неоптимальных параметров обработки это может требовать по-