

го моделирования, которые позволяют проводить сквозное моделирование оборудования магнетронного нанесения от этапа создания магнитной системы магнетрона до формирования покрытия на поверхности подложки.

Литература

1. *Голосов, Д. А.* Прогнозирование эрозии мишени магнетронных распылительных систем / Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, С. П. Кундас, А. П. Достанко // Проблемы физики, математики и техники. – 2010. – № 2 (3). – С. 62–67.
2. *Голосов, Д. А.* Распределение толщины тонкопленочных слоев при магнетронном нанесении на линейно перемещаемые подложки / Д. А. Голосов, А. П. Достанко, С. Н. Мельников // Вакуумная техника и технология. – 2012. – Т. 22, № 1. – С. 27–34.
3. *Голосов, Д. А.* Модель расчета толщины тонкопленочных слоев для магнетронных установок с подложкодержателями барабанного типа / Д. А. Голосов, С. Н. Мельников // Энергоэффективные электротехнологии. – СПб., 2011. – С. 49
4. *Golosov, D. A.* Calculation of the Elemental Composition of Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering of Mosaic Targets / D. A. Golosov, S. N. Melnikov, A. P. Dostanko // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2012. – Vol. 48, N 1. – P. 52–59.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛЕНОЧНОГО КИПЕНИЯ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

**В. С. Нисс¹, Ю. Г. Алексеев², А. А. Паршуто²,
А. Ю. Королев², А. А. Кособуцкий¹**

¹*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
тел.: 296-67-22, e-mail: niss@metolit.by*

²*Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», Минск, Беларусь,
тел./факс: 292-25-98, e-mail: korolyov@metolit.by*

В качестве альтернативы электрохимическому полированию в промышленности в последнее время для повышения качества поверхности широко используется метод электролитно-плазменной обработки (ЭПО) поверхностей металлических изделий.

ЭПО обеспечивает снижение шероховатости поверхности на 2–3 класса (до $Ra = 0,04$ мкм). Метод также применяется для очистки поверхности, удаления заусенцев, скругления острых кромок. Под действием рабочего напряжения в процессе ЭПО вокруг погруженного в электролит изделия возникает пленочное кипение и по всей обрабатываемой поверхности происходят импульсные электрические разряды.

Целью данной работы является исследование закономерностей влияния тепловых и электрических условий на устойчивость пленочного кипения и производительность ЭПО.

Для определения влияния тепловых условий на устойчивость пленочного кипения была предложена модель обработки детали при постепенном погружении ее в электролит. Момент срыва фиксировался по переходу процесса от стабильных значений напряжения и тока к броску тока и падению напряжения в 10 раз и более. Моделировались следующие условия обработки:

напряжение питания 320 В;

электролит – водный раствор сульфата аммония;

концентрация электролита 4 %;

мощность источника питания 96 кВт;

диапазон рабочих температур электролита 20–90 °С.

Зависимость максимально возможной площади обработки детали от температуры электролита, полученная в результате вычислений, представлена на рис. 1.

Как следует из графика, максимально возможная площадь обработки в стабильном процессе ЭПО в большой мере зависит от температуры электролита, имея при этом степенную зависимость от нее. В холодном (ниже 30 °С) электролите стабильная парогазовая оболочка (ПГО) существует при площади погружения в электролит не более 500–600 см². Нагрев электролита до 85–90 °С позволяет увеличить площадь обработки до 2000–2200 см². Расчетные данные хорошо согласуются с техническими результатами, полученными при аварийных режимах установки ЭПО, потому что срыв ПГО на детали площадью 2000 см² приводит к перегрузке и отключению питающей сети, что весьма нежелательно. Таким образом процесс ЭПО характеризуется

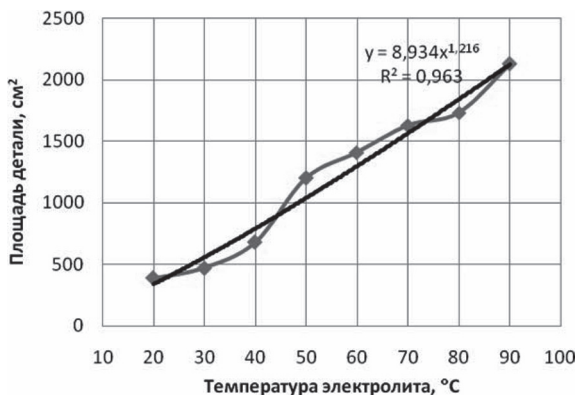


Рис. 1. Зависимость максимально возможной площади обработки детали от температуры электролита

меньшими энергетическими затратами по сравнению с классическим процессом пленочного кипения. Повышение эффективности ЭПО достигается при температуре электролита до 95 °С и максимально возможной мощности источника питания.

Экспериментальные исследования влияния тепловых условий на производительность обработки (скорость съема металла) проводились в диапазоне температур электролита 42–99 °С. Обработка осуществлялась при глубине погружения 125 мм и рабочем напряжении 300 В. Продолжительность ее составляла 10 мин.

По результатам измерения диаметра образцов после обработки рассчитаны значения средней скорости размерного съема. Зависимость средней скорости размерного съема от температуры электролита представлена на рис. 2. Из рисунка следует, что чем ниже температура (в пределах исследуемого интервала), тем интенсивнее протекает процесс ЭПО. Повышенную интенсивность съема при низких температурах можно объяснить уменьшенным парообразованием, формирующим толщину ПГО. Средняя скорость размерного съема при температуре электролита 42 °С составила 12,5 мкм/мин.

Обработка образцов при низких температурах электролита (менее 60 °С) сопровождалась периодическим срывом процесса из-за нарушения сплошности ПГО, что приводило к возникнове-

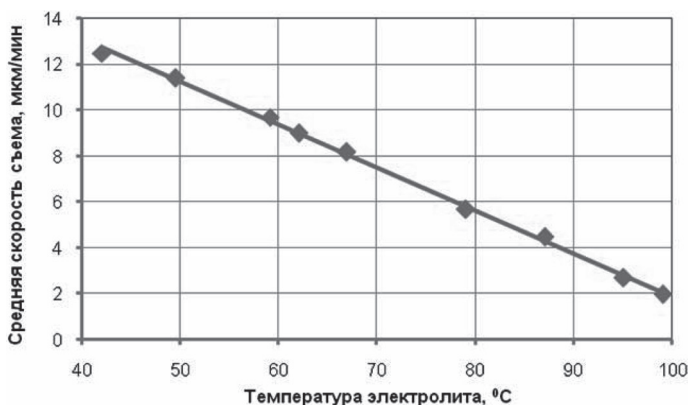


Рис. 2. Влияние температуры электролита на среднюю скорость размерного съема

нию значительных бросков рабочего тока. В результате наблюдались нагрев образцов и образование прижогов в местах подвода рабочего напряжения к образцам.

Дальнейшее увеличение температуры электролита (до 70–95 °C) обеспечило стабильность процесса ЭПО. Однако в результате повышения температуры усилилось парообразование и увеличилась толщина ПГО. Это привело к снижению средней скорости размерного съема до 7,5 мкм/мин при температуре 70 °C и до 3,8 мкм/мин при температуре 90 °C.

При достижении электролитом температуры 95–99 °C процесс ЭПО переходит в состояние, при котором ПГО теряет свои первоначальные размеры и форму и образец оказывается погруженным в сплошную подвижную пену, электрическое сопротивление которой значительно выше по сравнению с ПГО в установленном режиме ЭПО. При этом средняя скорость размерного съема снизилась до 2 мкм/мин.

Параметры электрической цепи источник питания – нагрузка, в частности емкость фильтрующего конденсатора и индуктивность обмоток трансформатора питания, оказывают значительное влияние на устойчивость пленочного кипения и производительность электролитно-плазменной обработки. Для определения

физических основ процесса электрического разряда исследовалось влияние разрядной емкости на физику процесса. Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

| Номер образца | Площадь обработки, см ² | Время обработки, с | Емкость, мкФ | Индуктивность, мГн | Удельный съем, г/(см ² ·с) |
|---------------|------------------------------------|--------------------|--------------|--------------------|---------------------------------------|
| 1 | 10,5 | 180 | 0 | 0,52 | 0,0318 |
| 2 | 10,5 | 180 | 0 | 1,04 | 0,0342 |
| 3 | 10,5 | 48 | 0 | 1,56 | 0,0359 |
| 4 | 10,5 | 120 | 80 | 0,52 | 0,0343 |
| 5 | 10,5 | 180 | 80 | 1,04 | 0,0327 |
| 6 | 10,5 | 180 | 80 | 1,56 | 0,0304 |
| 7 | 10,5 | 180 | 160 | 0,52 | 0,0334 |
| 8 | 10,5 | 180 | 160 | 1,04 | 0,0319 |
| 9 | 10,5 | 190 | 160 | 1,56 | 0,0306 |
| 10 | 10,5 | 180 | 0 | 0 | 0,0326 |

Зависимость удельного съема для образцов при обработке с разными значениями емкости и индуктивности приведена на рис. 3.

Из анализа полученных результатов видно, что увеличение индуктивности источника питания без подключения емкости приводит к повышению съема металла на 10,2 % при значении индуктивности 1,56 мГн (образец 3). Однако повышенный съем был вызван периодическими срывами парогазовой оболочки, о чем свидетельствует внешний вид образца – отсутствие четкой границы воздух – электролит на его поверхности, а также броски тока до 80–100 А. При этом электролитно-плазменный процесс замещался электрохимическим растворением и исчезновением эффекта полировки. Аналогичная картина наблюдалась и при индуктивности 1,04 мГн (образец 3), но в меньшем масштабе.

Сравнение результатов обработки детали без дополнительных индуктивностей и емкостей (образец 10, см. п. 1 в табл. 2) с другими образцами показывает отсутствие значительной разницы по удельному съему.

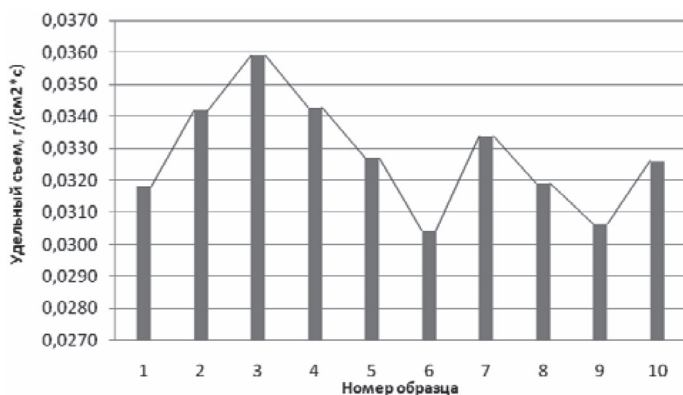


Рис. 3. Показатели удельного съема для различных образцов

Таблица 2. Изменение удельного съема при различных сочетаниях электрических параметров

| Номер п/п | Значения параметров С, мкФ/Л, мГн | Изменение удельного съема, % |
|-----------|-----------------------------------|------------------------------|
| 1 | 0/0 | 0,0 |
| 2 | 0/0,52 | -2,4 |
| 3 | 0/1,04 | 4,9 |
| 4 | 0/1,56 | 10,2 |
| 5 | 80/0,52 | 5,2 |
| 6 | 80/1,04 | 0,3 |
| 7 | 80/1,56 | -6,7 |
| 8 | 160/0,52 | 2,4 |
| 9 | 160/1,04 | -2,1 |
| 10 | 160/1,56 | -6,0 |

Таким образом, в результате моделирования с последующими экспериментальными исследованиями установлено, что в стабильном процессе ЭПО с увеличением температуры электролита от 30 до 90 °С максимально возможная площадь обработки увеличивается в 3,7–4 раза. Экспериментальные исследования показали, что при увеличении температуры электролита от 42 до 99 °С средняя скорость съема металла снижается в 6 раз. Из-

менение внешних емкости и индуктивности источника питания для электролитно-плазменной обработки не приводит с существенному увеличению производительности, а повышение индуктивности вызывает дестабилизацию процесса и существенное снижение качества обработки.

РАЗРАБОТКА И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ УПРОЧНЕНИИ И ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

**А. В. Паустовский¹, Н. М. Чигринова², Р. А. Алфинцева¹,
Ю. Г. Ткаченко¹, С. И. Ловыгин², С. Н. Кириленко¹,
Д. З. Юрченко¹, В. С. Терещенко¹**

*¹Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича
НАН Украины, Киев, Украина,
тел./факс: (8 044) 424-02-56, e-mail: der65@ipms.kiev.ua*

*²Институт сварки и защитных покрытий НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
тел.: (8 017) 293-98-52, e-mail: chygrynova@yandex.by*

При исчерпании ресурсов прочности материалов используют разные технологии упрочнения и восстановления рабочих поверхностей, вследствие чего увеличивается ресурс работы основного материала. Наиболее эффективным является метод электроискрового легирования (ЭИЛ) компактным электродом. При выборе материала электрода учитываются два основных фактора: его химический состав, определяющий функциональное назначение покрытия, а также структурное состояние, зависящее от технологии изготовления электрода.

Основным принципом создания электродных материалов для износостойких покрытий является условие гетерогенности их структуры [1, 2]. Одним из вариантов такой структуры является наличие эвтектики, состоящей из твердых растворов на основе