

Н. М. Чигринова, д-р техн. наук, проф.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Тел./Факс: + 375 172939581; E-mail: chygryanova@ yandex.by

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В статье приведены данные по использование современного информационно-аналитического обеспечения приемов управления многофакторной системой «металл – управляющее воздействие – среда – покрытие» при микродуговой обработке (МДО) для установления взаимосвязей между технологическими режимами МДО, структурой и свойствами покрытия, условиями эксплуатации и поведением обработанного объекта в этих условиях, а также для гарантированного соответствия полученного продукта принятым критериям качества и надежности в работе.

Ключевые слова: информационно-аналитическое обеспечение, управление, микродуговое оксидирование покрытие, электрические параметры, качество, специализированные устройства, программное обеспечение.

N. M. Chigrinova

INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT OF QUALITY MANAGEMENT PROCESSES AND SURFACE ENGINEERING OF MECHANICAL ENGINEERING PRODUCTS WHEN FORMING COATINGS

The article provides data on the use of modern information and analytical support for control techniques of a multifactor system “metal – control action – environment – coating” during micro-arc machining (MAM) to establish relationships between the technological modes of MAO, the material being processed, its structure and properties, operating conditions and the behavior of the processed object under these conditions, as well as to ensure that the resulting product meets the quality and operational reliability criteria accepted for each specific case.

Keywords: information and analytical support, control, micro-arc oxidation coating, electrical parameters, quality, specialized devices, software.

1. Введение

Государственной программой развития машиностроительного комплекса Республики Беларусь на 2021 – 2025 годы предусматривается инновационное развитие данной отрасли, ускоренный переход к использованию новых высокопроизводительных и ресурсосберегающих технологий на основе применения современного информационно-аналитического обеспечения. В результате реализации Госпрограммы базовые показатели социально-экономического развития машиностроения должны существенно улучшиться в первую очередь за счет комплекса мер по их технической и технологической модернизации.

Перспективными путями повышения конкурентоспособности идущей на экспорт и необходимой для развития экономики республики продукции машиностроения является создание и развитие энергоемких и эффективных технологий, способных обеспечивать преимущества производимых изделий за счет использования инноваций в процессе их создания, связанных с формированием в критических зонах функционально адаптированных покрытий. Наличие таких малозатратных ресурсо- и энергосберегающих инновационных технологий позволит осуществлять ремонт, техническое обслуживание и модификацию различных агрегатов машиностроения

без привлечения иностранных центров технического обслуживания и ремонта. Кроме того, появится возможность освоить новые виды деятельности, обеспечить широкий спектр услуг для иностранных поставщиков и в перспективе завоевать новые рынки заказов на десятилетия вперед.

Перспективным направлением создания защитных покрытий с требуемым набором функциональных свойств на изделиях машиностроения широкой номенклатуры является метод микродугового оксидирования (МДО) [1]. Данный процесс отличается низкотемпературной обработкой вентильных металлов (Al, Ti, Zr, Nb, Ta, Mg) и их сплавов с созданием оксидо-керамических покрытий. Вместе с тем широкое промышленное использование МДО сдерживается его относительно невысокой производительностью, стохастическим характером формирования покрытий, что не позволяет гарантировать получение равнотолщинных слоев с регулярной структурой и однородными свойствами обработанной поверхности [2–4].

Современный уровень проведения исследований и экспериментов с целью разработки работоспособной и производительной технологии формирования покрытий с прогнозируемыми параметрами требует точного и выверенного подхода к выработке приемов управления динамикой и кинетикой процессов их создания и роста.

Поэтому целью настоящего исследования является использование современного информационно-аналитического обеспечения приемов управления многофакторной системой «металл – управляющее воздействие – среда – покрытие» при микродуговой обработке (МДО) для установления взаимосвязей между технологическими режимами МДО, обрабатываемым материалом, его структурой и свойствами, условиями эксплуатации и поведением обработанного объекта в этих условиях, а также для гарантированного соответствия полученного продукта принятым для каждого конкретного случая критериям качества и надежности в работе [5].

В данном исследовании указанную проблему решали посредством разработки и подключения к специализированному оборудованию МДО двух специализированных устройств для более точной реализации требуемых параметров создаваемых покрытий и повышения производительности процесса МДО в целом.

2. Основное содержание и результаты работы

Для изучения особенностей микродуговых процессов при изменяющихся условиях и параметрах оксидирования был создан автоматизированный информационно-измерительный комплекс (ИИК) [6], предназначенный для высокоточного измерения и регистрации в режиме реального времени с одновременным выводом полученных графиков на дисплей электрических характеристик МДО, разработаны программное обеспечение и методика измерения и регистрации в режиме online постоянных напряжения и тока с возможностью усреднения полученных данных, импульсных напряжения и тока с определением числа импульсов, их высоты, длительности и средних значений, амплитуды импульсов за время протекания исследуемого процесса, среднеинтегральных значений тока и напряжения с последующей коррекцией online электрических параметров в управляющем процессом МДО блоке специализированного оборудования [7].

Концепция ИИК с использованием информационных технологий базируется на том, что обработка поверхности осуществляется с помощью микродуговых разрядов, формирующих импульсный электрический ток.

ИИК (рис.1) создан на базе персональной ЭВМ типа IBM PC с применением внешнего восьмиканального АЦП ADCS 5K/12-8 и согласованного с ним усилителя

AMP-8. С помощью разработанного программного обеспечения учитывали конкретные условия работы АЦП ADCS 5K/12-8. Контроль вольт-амперных режимов посредством ИИК-1 позволяет усовершенствовать работу стандартного оборудования, обеспечивая получение высокоплотных и точных покрытий в энергосберегающем режиме. Кроме того, прирост толщины покрытия существенно ускоряется, делая МДО более производительной.

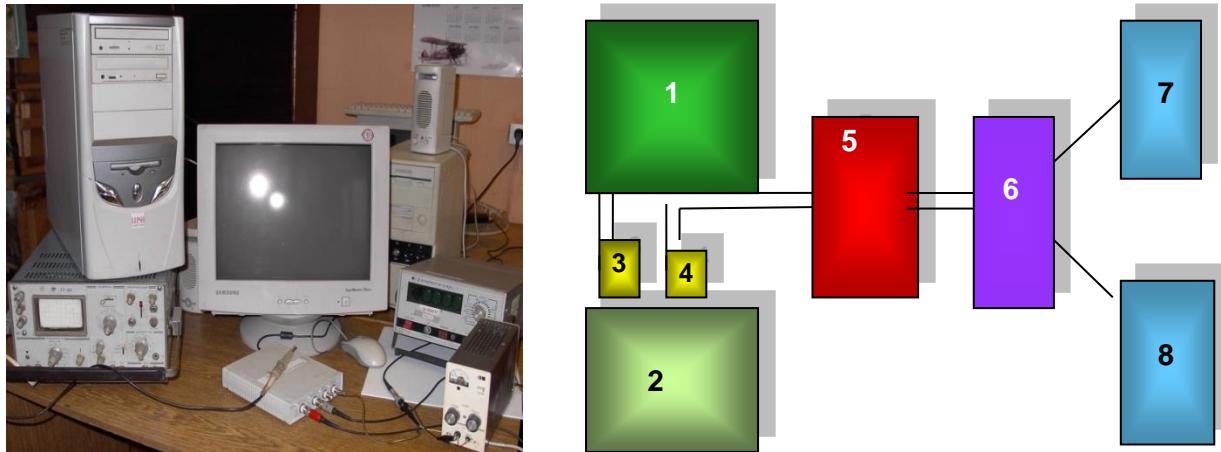


Рисунок 1. Внешний вид и блок–схема ИИК:
 1 – серийный прибор (стойка МДО-2); 2 – ванна с электролитом;
 3 – делитель напряжения; 4 – датчик тока;
 5 – АЦП (плюс усилитель при необходимости);
 6 – системный блок компьютера;
 7 – устройство визуального отображения информации (монитор);
 8 – устройство отображения информации на бумажный носитель (принтер).

Таблица 1. Назначение и маркировка комплектующих ИИК-1

Комплектация	Назначение	Маркировка
Системный блок	Для осуществления управления видеомонитором, пультовым терминалом, АСМ, АЦП и для обработки цифровых сигналов АЦП	IBM PC
Видеомонитор	Для отображения символьной и графической информации	ЖКИ
Пультовой терминал	Для ввода команд ИИК-1 оператором	
Аналоговый селектор – мультиплексор	Для переключения аналоговых выходов измерительных датчиков	АСМ
Метрический аналого-цифровой преобразователь	Для преобразования аналоговых сигналов в цифровой код для измерения усилия сжатия электродов	ADCS 5K/12-8
Усилитель сигналов	Для усиления сигнала датчика при измерении усилия сжатия электродов для стабилизации импульсов тока	AMP-8
Блок питания стабилизованный		
Датчик тока	Для измерения действующих значений электрического тока	БПС 3-15 В, ДТПХ-30
Делитель напряжения	Для измерения действующих значений напряжения	Коэффициент деления 118,8

Отличие и преимущества созданного устройства по сравнению с существующими приборами аналогичного назначения – осциллографами, самопищущими датчиками и т.п. заключаются в возможности непрерывной регистрации в режиме реального времени высокоточного изменения энергосиловых параметров с одновременной записью и обработкой цифровой информации с выработкой управляющего сигнала.

С помощью указанного устройства, подсоединяемого к серийному оборудованию любого класса и назначения, по разработанной методике согласно ОСТ 37.004.004.-74 и ТУ в режиме реального времени измеряли и регистрировали датчиком, основанном на эффекте Холла ДТПХ-5 и ДТПХ-30 на 5 А и 30 А соответственно, напряжение питания – 15 В; выходное напряжение – 2–6–10 В, импульсные напряжение и ток, частота, амплитуда и длительность импульса и их средние значения, средние интегральные значения тока и напряжения, одновременно записываемые в файл.; погрешность измерения в диапазоне рабочих температур, не более – 2%; нелинейность характеристик датчика, не более 3%.

Опрос каналов производили последовательно с частотой, определяемой возможностями АЦП и компьютера. При этом разработанные программы позволяли вводить задержку и использовать усреднение по количеству замеров, а также корректировать нуль датчика Холла. Для данных датчиков существует проблема ухода ноля, которую решали программным путем. Для учета нелинейности характеристик датчика и усилителя проводили сравнительные замеры и по ним получали аппроксимирующие формулы: $A = ((V - V_0) \cdot 1.35) \cdot 1000$ – для ДТПХ-5,

$A = ((V - V_0) \cdot 7.8811247) \cdot 1000$ – для ДТПХ-30, где A – ток в мА, V – напряжение выдаваемое датчиком в В, V_0 – напряжение выдаваемое датчиком при нулевом токе в В.

Для обработки импульсных сигналов выполняли моделирование их формы с последующим расчетом с помощью созданных компьютерных программ. В процессе экспериментов осуществляли индивидуальную калибровку каналов ИИК, для чего применяли потенциометр ПП-63 с классом точности 0,05 %. Для сигналов, по форме близких к треугольным или синусоидальным с произвольным распределением амплитуд, ошибка не превышала 0,05% для основной частоты работы установки МДО в 150 Гц.

Программно-аппаратное обеспечение блока измерения постоянных и импульсных токов и напряжений базируется на ряде разработанных компьютерных программ [4]. Корректировка результатов измерения напряжения производится с помощью разработанного и изготовленного делителя с коэффициентом деления 118,8 (рис. 2).

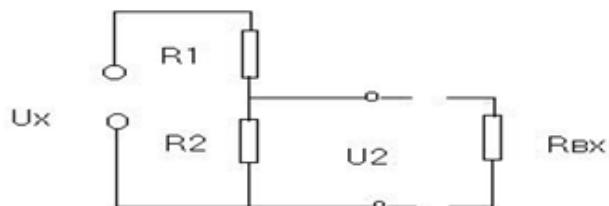


Рисунок 2. Делитель напряжения:
 U_x – входное напряжение, U_2 – выходное напряжение,
 R_1 и R_2 – сопротивления плеч делителя,
 R_{bx} – входное сопротивление измерительного прибора (АЦП)

Для его расчета и моделирования была разработана соответствующая программа (Delitel.mcd), в которой заложены функции, позволяющие проводить оптимизацию делителя. Программа состоит из трех блоков.

Блок 1. Задают исходное напряжение U_x , желаемое напряжение U_2 , сопротивление одного из плеч делителя, в данном случае R_2 . При расчете учитывают входное сопротивление измерительного прибора R_{bx} , что позволяет использовать и приборы с низким входным сопротивлением. По заданным параметрам рассчитывают сопротивление второго плеча делителя, в данном случае R_1 .

Блок 2. Используют для подбора R_1 из ряда промышленно выпускаемых резисторов.

Блок 3. По подобранным в блоках 1 и 2 резисторам рассчитывают протекающие по ним токи и выделяющиеся на них мощности.

При неудовлетворительности полученных значений для достижения желаемого результата в блоках 1 и 2 изменяют соответствующие параметры.

Постоянные ток и напряжение измеряли в режиме реального времени, опрос каналов производили последовательно с частотой, определяемой возможностями АЦП и компьютера. При этом разработанные программы позволяли вводить задержку и использовать усреднение по количеству замеров, а также корректировать нуль датчика Холла.

При подключении к установке МДО делителя напряжения следует использовать стандартный делитель (входит в комплект осциллографа) с коэффициентом деления 1:100. Измерительный щуп подсоединяется к «+» установки МДО, корпусной щуп – к «–» установки.

С помощью АЦП измеряли эффективные значения импульсов напряжения и тока, длину положительных импульсов напряжения и тока, максимальные значения импульсов напряжения и тока, частоту импульсов напряжения и тока, число импульсов

напряжения и тока. Их настраивали согласно разработанному компьютерному меню «Параметры» (рис. 3).

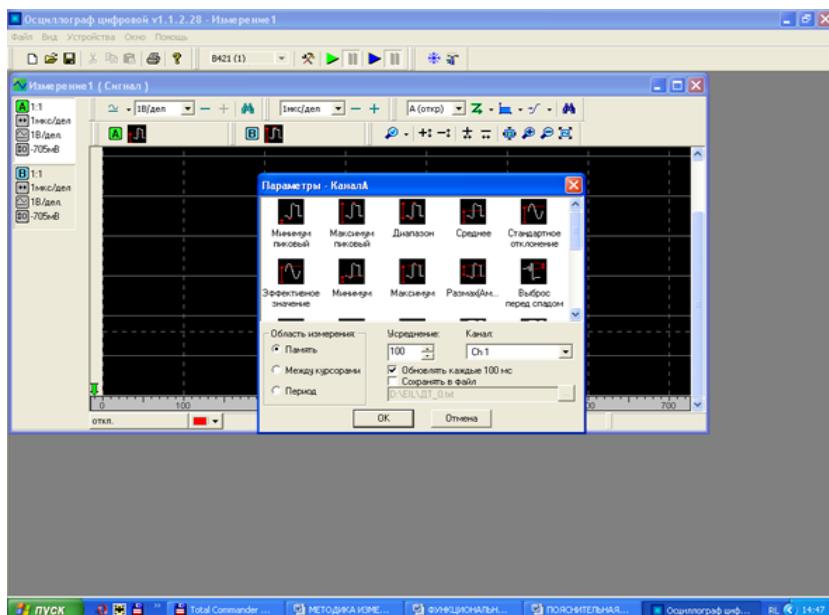


Рисунок 3. Меню «Параметры» АЦП В-421

Калибровку датчиков тока ДТПХ-5, ДТПХ-30, ДТПХ-50, ДТПХ-100 (цифра после буквенного обозначения указывает максимальный ток измерения) проводили на основе экспериментальных данных, полученных на гостированных приборах с точностью измерения не больше 2,5 %. Данные датчики работают на основе эффекта Холла и выдают напряжение, которое необходимо преобразовать в ток. Датчики построены таким образом, чтобы это преобразование было линейным (хотя при использовании более точных гостированных приборов можно проводить и нелинейную аппроксимацию, повышающую точность).

Полученные данные использовали для корректировки ПО, что позволило получить формулы учета нелинейности работы АЦП и усилителя AMP-8 для каждого канала. Измерения проводили с помощью источника тока, который замеряли гостированным прибором и также гостированным прибором замеряли выходное напряжение на датчике тока. По этим данным строили калибровочные таблицы, по которым и производили аппроксимацию посредством программы CurveExpsre (возможно применение и других программ и методов) (табл. 2).

Таблица 2. Калибровочная таблица

ДТПХ-50		ДТПХ-100	
Напряжение (В)	Ток (А)	Напряжение (В)	Ток (А)
6	0	6	0
6,38	5	6,18	5
6,45	6	6,38	10
6,71	10	6,58	15
7,1	15	6,78	20
7,45	20	7,15	30
8,2	30		

Результаты аппроксимации приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты аппроксимации

ДТПХ-50		ДТПХ-100	
y – Амперы x - Вольты	y – Вольты x - Амперы	y – Амперы x - Вольты	y – Вольты x - Амперы
Linear Fit: $y=a+bx$			
Coefficient Data:			
a = -82.240158 b = 13.702239 s = 0.19111391 r = 0.99985492	a = 6.0022106 b = 0.072959601 s = 0.01394562 r = 0.99985492	a = -154.93578 b = 25.841174 s = 0.21457560 r = 0.99984213	a = 5.9958571 b = 0.038685714 s = 0.00830232 r = 0.99984213

Примечание: s – стандартная ошибка , r – коэффициент корреляции

Полученные данные использовали для корректировки ПО, что позволило получить формулы учета нелинейности работы АЦП и усилителя AMP-8 для каждого канала.

В результате реализуемая точность измерения составила 0,1 мВ, для 0–го и 1–го каналов – 0,05%, для остальных – не менее 0,1%. Для сигналов, по форме близких к треугольным или синусоидальным с произвольным распределением амплитуд, для основной частоты 150 Гц при работе оборудования МДО ошибка не превышала 0,05%. На других частотах в пределах возможностей АЦП ошибка $\leq 0,5\%$.

Помимо фиксации электрических параметров процесса МДО выполняли оценку кинетики прироста толщины покрытия при изменении уровня электрического и механического воздействий на металлическую основу. При этом контролировали интенсивность возникающего в процессе обработки искрения, т.к. известно [4, 7, 8], что при микродуговом оксидировании оно меняет свои интенсивность и спектральные характеристики по ходу процесса, что является косвенным свидетельством изменений в уровне энергетического воздействия и происходящих в обрабатываемом материале структурных изменениях. Это находит свое отражение в интенсивности излучения и спектра сопровождающего указанные процессы искрения [9].

В связи с этим было разработано, изготовлено и опробовано устройство контроля и управления кинетикой нарастания толщины покрытий по продолжительности микроплазмоискровых воздействий (УККП) (рис. 4) на базе изменения «цвета искры» с алгоритмом, обеспечивающим оперативный, надежный и технологичный контроль качества формируемых покрытий, с получением достоверной информации о продолжительности процесса создания слоев определенных толщин, о начале их разрушения в режиме реального времени [6].

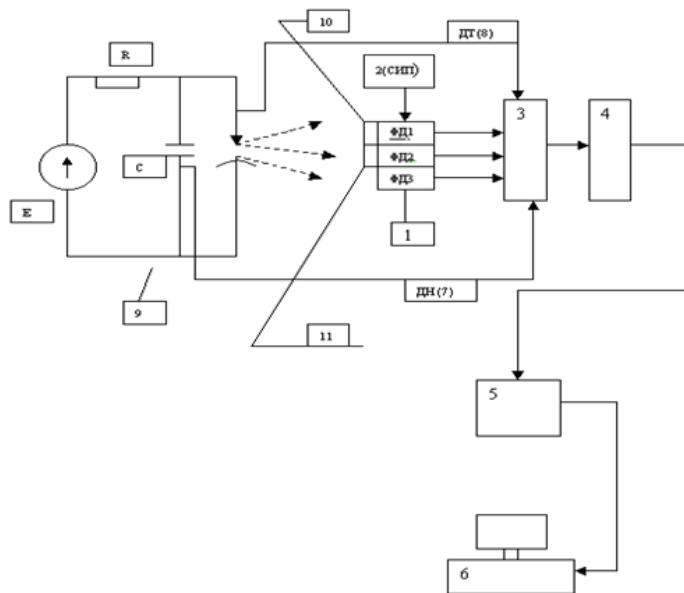


Рисунок 4. Структурная схема устройства для определения оптимальной продолжительности микродугового оксидирования:

- 1 – блок фотодиодов (ФД1, ФД2, ФД3);
- 2 – стабилизированный источник питания (СИП);
- 3 – многоканальный усилитель (У8);
- 4 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 5 – системный блок;
- 6 – терминал; 7 – датчик напряжения (ДН); 8 – датчик тока (ДТ);
- 9 – установка электроискровой обработки; 10, 11 – светофильтры

Использование УККП позволяет решить поставленную задачу за счет достижения технического результата, сущность которого состоит в том, что в режиме реального времени удается контролировать электрические параметры и продолжительность микродуговой обработки, определяя и обеспечивая качество – толщину, высокие равнотолщинность и сплошность покрытия.

Алгоритм контроля базируется на свойствах света [9, 10].

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2} \quad (1)$$

где E , I , α , r – освещенность, сила света, угол между нормалью к поверхности и направлением на источник, расстояние до источника, соответственно.

Учитывая, что диаметр фотодиодов около 3 мм, можно считать $\cos \alpha$ и r для них одинаковыми. Тогда отношения величин освещенности ЕФД 1 / ЕФД 3 и ЕФД 2 / ЕФД 3 будут мало зависеть от направления на обрабатываемую деталь и расстояния до нее. Это дало возможность выделить спектральные яркости и по их изменению позволило судить о характере процесса нанесения покрытия.

3. Общий алгоритм экспериментов и исследований

Для оценки эффективности микродуговой обработки использовали энергетический подход. Методически определение скорости роста толщины покрытий выполняли на образцах одного размера в зависимости от условий их формирования до получения толщины слоя в 100 мкм. Цель – оптимизация величин электрических параметров МДО, определяющих минимальный расход энергии на образование покрытия требуемой толщины.

Созданный ИИК-1 с указанным программным и аппаратурным обеспечением, а также УККП подключали к серийному оборудованию МДО и с их помощью были получены осциллограммы изменения электрических параметров процесса в режиме on line и данные о яркости и интенсивности искрения в процессе микродугового оксидирования в различных по химической активности электролитах, одним из основных факторов, оказывающих влияние на динамику МДО и параметры формируемых покрытий: активированном разнозаряженными полирадикалами – ЭЩ1, активированном наличием в растворе УДА – ЭЩ2 и активированном ультразвуком – ЭЩ 3.

Расчет расхода энергии на образование покрытия толщиной 1 мкм определяли по формулам

$$P_i = U_i * t_i, \quad (2)$$

где P_i – мощность за измерительный цикл (Bm); U_i – эффективное напряжение за один измерительный цикл (B); t_1 – время начала процесса; t_2 – время окончания процесса; $\Delta t = t_2 - t_1$ – длительность процесса (c); N – количество измерительных циклов. $t_i = \Delta t/N$ – средняя длительность измерительного цикла (c);

$$A_i = P_i * t_i, \quad (3)$$

где A_i – энергия (работа) за измерительный цикл ($Dж$).

Тогда

$$A = \sum_{i=1}^N A_i = \sum_{i=1}^N P_i * \frac{\Delta t}{N}, \quad (4)$$

где A – энергия (работа) за время протекания процесса ($Dж$); I_i – эффективный ток за один измерительный цикл (A); $A_{мкм} = A / h$ – энергия (работа) затраченная на рост 1 мкм покрытия ($Dж/мкм$); h – толщина покрытия (мкм).

Расчет скорости роста покрытия осуществляли по формуле:

$$V_{мкм} = h / \Delta t, \quad (5)$$

где $V_{мкм}$ – скорость роста покрытия ($\text{мкм}/\text{мин}$).

На осциллограммах изменения в режиме реального времени токовых характеристик при протекании процесса МДО в электролитах различной химической активности с помощью подключенных устройств удалось зафиксировать заметное различие в их уровнях: если в стандартном электролите ЭЩ при МДО в гальваниостатическом режиме средние значения тока соответствуют заданным с помощью оборудования, то в активированных растворах при прочих равных задаваемых параметрах оксидирования – плотности тока, времени обработки и одинаковых размерах оксируемых образцов были отмечены более высокие, в 1,5 – 2,6 раза, значения тока и напряжения (рис. 5).

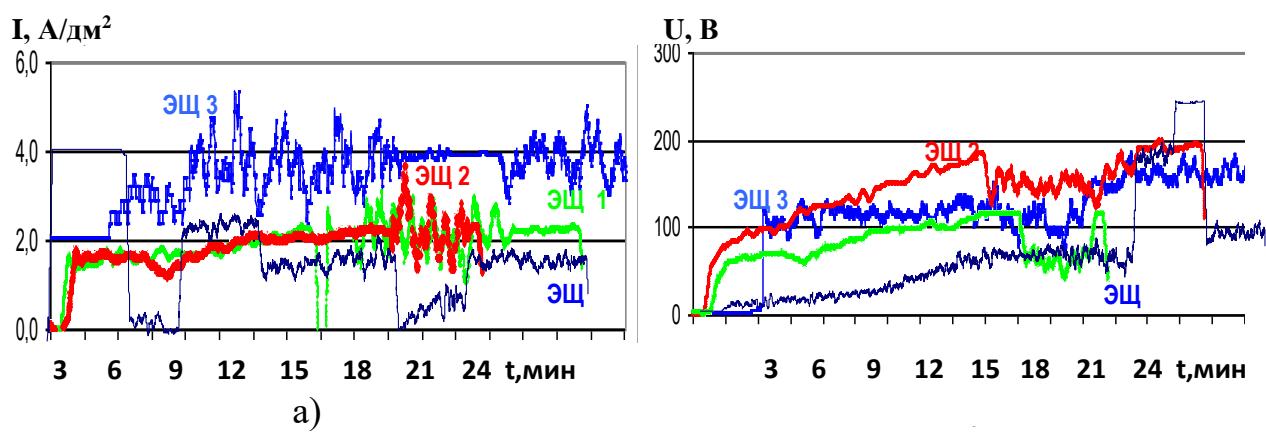


Рисунок 5. Изменение электрических параметров АМДО в режиме реального времени
Электролиты: ЭЩ – стандартный, ЭЩ 1 – химически активированный, ЭЩ 2 –
активированный заряженными полирадикалами, ЭЩ 3 –активированный
ультразвуковым полем

4. Заключение

В результате проведенной работы по автоматизации процесса МДО с целью информационно-аналитического обеспечения приемов управления многофакторной системой «металл – управляющее воздействие – среда – покрытие» при микродуговой обработке (МДО) были разработаны и опробованы:

1. Автоматизированный информационно-измерительный комплекс (ИИК), позволяющий осуществлять высокоточные измерения и регистрацию в режиме реального времени с одновременным выводом полученных графиков на дисплей электрических характеристик МДО на основе созданного программного обеспечения и методики измерения и регистрации в режиме online постоянных напряжения и тока.

2. Устройство контроля и управления кинетикой нарастания покрытий по продолжительности микроплазмоискровых воздействий (УККП).

Подключение данных устройств к специализированным установкам МДО и применение разработанных методик оперативного, надежного и технологичного контроля качества формируемых покрытий, позволило:

3. Фиксировать усредненные данные импульсных напряжения и тока с определением определением числа импульсов, их высоты, длительности и средних

значений, обеспечило получение мгновенной достоверной информации о продолжительности процесса создания слоев определенных толщин и качества, а также о начале их разрушения.

4. Установить экспериментально с помощью разработанных устройств, что при стандартной работе серийного МДО-оборудования в активированных электролитах происходит интенсификация анодно-катодных взаимодействий с ускорением в 1,5–2,5 раза массопереноса и эффектом повышения на 20–25 % электрической активности растворов.

5. Зафиксировать в активированном ультразвуком электролите возрастание амплитуд импульсов тока и напряжения на 87% и 67% соответственно и повышение их частоты на 90%, что связано с увеличением давления в зоне пробоя и созданием упруго-деформационного поля с высоким уровнем энергии в виде излучения ультразвука. Возникающие при этом ударные волны наклепывают оксидируемую поверхность, поддерживают высокую температуру в реакционной зоне, продлевая стадию термолиза в электролите. В результате происходит ускоренный в 1,3–2,8 раза рост толщины формируемых оксидных покрытий, снижение их пористости с 40 % до 1–3 % и сокращение энергозатрат на их получение более, чем в 2,5 раза [1].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Чигринова, Н. М. Анодное микродуговое оксидирование: проблемы, решения, перспективы /Н. М. Чигринова // Монография. Mn.: Изд-во «Бестпринт». – 2019.– 299 с. ISBN 978-985-90509-4-7.
2. Yerokhin, A. L. Plasma electrolyte fabrication of oxide ceramic surface layers on aluminium alloys / A. L. Yerokhin, A. A. Voevodin, V. V. Lyubimov, J. S. Zabinski, M. S. Donley // Surface and coating Technology.–1998.– № 3(110). – Pp. 140–146.
3. Баковец, В. В. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / В. В. Баковец, О. В. Поляков, И. П. Долговесова. – Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1990. – 168 с. ISBN 978-5-94836-266-3.
4. Слонова, А. И. Защита металлов / А. И. Слонова, О. П. Терлеева, Г. А. Марков. – 1997. – Т. 33, № 2. – С. 208
5. Чигринова, Н. М. Перспективы применения автоматизированных информационно-измерительных систем для управления и оптимизации электрофизических параметров микроплазмоискровых технологий / Н. М. Чигринова, А. В. Дроздов // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: материалы Междунар. конф., С.-Петербург, 30 мая 2005 г. – С.-Петербург, 2005. – С. 52–55.
6. Чигринова, Н. М. Автоматизированные комплексы для контроля энергосиловых параметров при микроплазмоискровой обработке объектов / Н. М. Чигринова, В. Е. Чигринов // Пленки и покрытия – 2005: материалы 7 Междунар. конф., С.-Петербург, 24–26 мая 2005 г. – С.-Петербург, 2005. – С. 4–6.
7. Чигринова, Н. М. Инновации в электроискровых технологиях: теория и практика /Н. М. Чигринова // Монография.– Минск, Изд-во « Бестпринт». –2018.– 262 с. ISBN 978-985-6963-91-2.
8. Марков, Г. А. Стадийность в анодно-катодных микроплазменных процессах / Г. А. Марков [и др.] / Электрохимия. – 1989. – Т. 25, вып. 11. – С. 1473–1479.
9. Гулаков, И. Р. Регистрация ионизирующих излучений : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности “Ядерные физика и технологии” / И. Р. Гулаков. – Минск: Вышэйшая школа, 2021. – 286 с.: ил., табл.

ISBN 978-98506-3309-5.

10. Спектроскопия и люминесценция молекулярных систем / Д. С. Умрейко [и др.] под ред. Е. С. Воропай, К. Н. Соловьев, Д. С. Умрейко ; Белорусский государственный университет, Национальная академия наук Беларуси (Минск). – Минск: Издательство БГУ, 2002. – 399 с.: ил. ISBN 985-445-542.4

Поступила в редакцию 24.03.2025 г.