

УДК 629.621.432.691.9.048.4

**Н. М. Чигринова**, д-р техн. наук, профессор, **В. Е. Чигринов**, зам. декана МТФ, Республика Беларусь, Минск, Белорусский национальный технический университет.  
Тел. +375(17)293-95-81, E-mail: [chygrynova@yandex.ru](mailto:chygrynova@yandex.ru)  
Тел. +375(17)292-42-53.

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ МИКРОПЛАЗМЕННОГО СИНТЕЗА КЕРАМИКОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ ВЕНТИЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

*Предложен метод ультразвуковой интенсификации микроплазменного синтеза керамикоподобных покрытий вентильных металлов и рассмотрено влияние ультразвуковой активации электролита на течение импульсных процессов при АМДО с фиксированием эффекта появления большего количества высокочастотных затухающих колебаний нерегулярной формы с высокой амплитудой по току (от 5 А и выше), который можно объяснить возникновением синергетического эффекта.*

**Ключевые слова:** анодное микродуговое окисление, ультразвуковая интенсификация, импульсы тока и напряжений, осциллограммы, развертка, затухающий сигнал, амплитуда тока и напряжения.

**N. M. Chygrynova, V. E. Chygrynov**

## ULTRASONIC INTENSIFICATION MICROPLASMA SYNTHESIS COATINGS LIKED CERAMIC OF VALVE METALS

*The proposed method of ultrasonic intensification microplasma synthesis coatings liked ceramic of valve metals and considered the influence of ultrasonic activation of the electrolyte during the pulse processes in AMDO with recording the effect of the appearance of an increasing number of high frequency damped oscillations of irregular shape with high amplitude current (5 and above) which can be explained by the occurrence of a synergistic effect.*

**Keywords:** anodic microarc oxidation, ultrasonic intensification of the current pulses and voltages, waveforms, scan, fading signal, the amplitude of current and voltage.

### Введение.

Отработка принципов управления состоянием материала и изменением его реологических характеристик в процессе анодного микродугового окисления (АМДО), создание алгоритма направленного влияния на свойства формируемых покрытий осуществляется на основе изучения влияния различных параметров процесса на динамику и кинетику взаимодействия на границе раздела электролит – основа – покрытие, анализа термо- и механических напряжений, действующих на материал. Как результат такого исследования – оптимизация уровня энергетического влияния, схем изменения в следящем режиме контактной поверхности, свойств передающей среды, структурного состояния покрытия.

Для направленного микроплазменного синтеза пленок заданного химического состава и кристаллической структуры на аноде при окислении обычно используются различные способы управления процессом МДО, в том числе изменение *состояния* электролита. Одним из вариантов сокращения энергозатрат на формирование оксидных покрытий в процессе АМДО является активация всех происходящих взаимодействий посредством пропускания через электролит ультразвука УЗ.

Данный вид интенсификации влияет на турбулентность потока электролита и равномерность распределения в его объеме составляющих компонентов. Эффективность ультразвукового перемешивания электролита значительно выше по сравнению с обычным, пневмо- гидродинамическим барботажем, поскольку междуэлектродный слой

между анодом и катодом имеет толщину 10 – 20 мм, как следствие, большой градиент температуры и концентрации ионов и заряженных дисперсных частиц. При ультразвуковой активации электролита эффект достигается следующими факторами: кавитация на поверхности электродов, ускорение теплообмена в растворе электролита, интенсификация проникновения электролита в микропоры и трещины, диспергирование слипшихся частиц и жидких кластеров в электролите, дегазация, интенсификация кристаллизации расплавленных соединений и электрохимических процессов [1]. Высокие частоты колебаний при малой амплитуде, характерные для УЗ, создают акустическое поле с высоким уровнем энергии [1]. Используется УЗ в виде импульсов, что позволяет управлять процессами массопереноса в электролите, а также составом и структурой формируемых покрытий. Кроме того, воздействие ультразвука на твердый материал изделия вызывает микро-деформацию и повышение плотности дислокаций в поверхностных слоях, что интенсифицирует диффузионные процессы. Под действием ультразвука возможно осуществлять и акустическую коагуляцию, т.е. укрупнение взвешенных частиц в жидкости и газе. Ввиду сложной рецептуры электролита, имеющего водную основу и насыщенного различными ингредиентами, включая коллоидные образования, появляется возможность структурирования самого электролита, образования в нем фрактальных структур [2], что может оказать существенное влияние на состав и количество формируемых в покрытии фаз, а также на его микрорельеф.

### **Основное содержание и результаты работы**

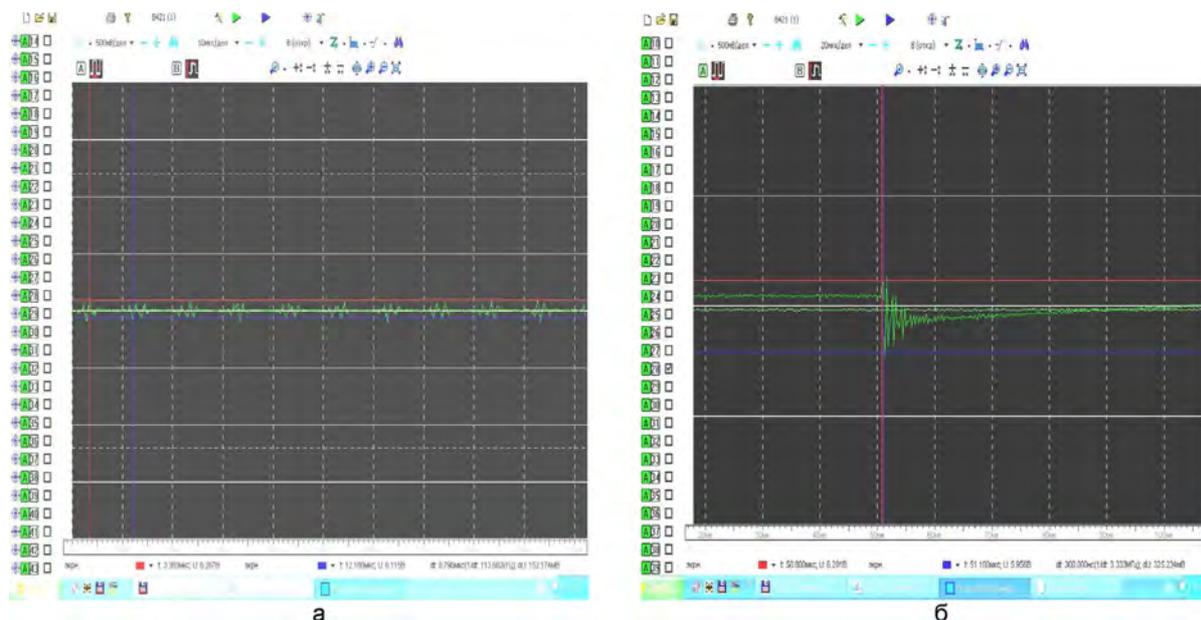
Формирование оксидных покрытий методом анодного микродугового оксидирования на поверхности технического сплава алюминия А 99 проводилось на установке МДО-2 УВИЕ 440. 329. 005, которая содержит трехфазный источник питания, формирующий импульсы выпрямленного напряжения частотой 150 Гц и амплитудой до 540 В, повышающий трансформатор и силовой блок. Время обработки составляло 20 минут. Для измерения и регистрации электрических параметров процесса АМДО в режиме реального времени при изменяющихся параметрах АМДО использовался созданный контрольно-измерительный модуль на базе ПЭВМ [4] с высокочастотными аналого-цифровыми преобразователями сигналов и датчиков на эффекте Холла. Ультразвуковая активация осуществлялась с помощью ультразвукового генератора мощностью 4,2 кВт и частотой 22 кГц. Энергосиловые характеристики снимались с помощью цифрового осциллографа В-421.

Согласно разработанной идентификационной модели управления и созданной системе адаптивного управления [3,4], методикам измерения в режиме реального времени электрических параметров процесса АМДО с помощью автоматизированного информационно-измерительного комплекса ИИК регистрировались среднеинтегральные значения тока и напряжения, их импульсные характеристики, что позволило оперативно корректировать процесс нарастания толщины покрытия [5].

С целью определения характера и степени воздействия на динамику роста покрытия ультразвука, а также для выяснения механизма его влияния на кинетику взаимодействия анода и катода был проведен ряд экспериментов с фиксацией величины формируемого в различных условиях ультразвукового сигнала с помощью высокочастотного цифрового осциллографа В-421. При этом снимались осциллограммы при автономной работе УЗ-генератора; при автономной работе установки АМДО; при работе установки АМДО с пропуском ультразвука, но без погруженного в ванну анода; при аналогичной работе, но с погруженным в электролит анодом. Ток измерялся с помощью датчика на основе эффекта Холла ДТПХ-50. Для проведения экспериментов

использовалась серийная установка АМДО, ультразвуковой генератор УЗМ-1,5 с частотой 22 кГц.

На рис. 1 приведены осциллограммы периодического затухающего сигнала при автономной работе самого ультразвукового генератора (рис. 1, а) и серийной установки АМДО (рис. 1, б). Видно, что при работе собственно УЗ-генератора частота сигнала составляет 2 МГц, как и при автономной работе серийной установки АМДО, но диапазон изменения сигнала существенно уже – около 150 мВ, что соответствует току в 2 А при величине тока в 5 А и 350 мВ в установке АМДО.



а – автономная работа УЗ- генератора; б – автономная работа установки АМДО  
Рисунок 1 - Осциллограммы периодического затухающего сигнала

При анализе сигнала, полученного при пропускании ультразвука через электролит при работающей установке АМДО (рис. 2), установлено, что в электролите его частота составляет 2 МГц, а диапазон изменения частот – 700 мВ, что соответствует току в 10 А.

Таким образом, очевидно, что именно электролит оказывает определяющее влияние на изменение импульсных характеристик тока при ультразвуковом воздействии.

Сравнение осциллограмм, приведенных на рис. 3 и различающихся степенью развертки сигнала, позволяет заключить, что в электролите при пропускании через него ультразвука возникают по крайней мере два типа колебаний: непериодические (справа, вверху), и периодические затухающие (остальные). Наличие двух типов колебаний также должно интенсифицировать процесс массопереноса, приводя к более ускоренному росту покрытия при прочих равных условиях оксидирования.

Осциллограммы без погружения в электролит оксидируемого изделия (анода) и с анодом в электролите иллюстрирует рис. 4. Из приведенных осциллограмм видно, что при пропускании ультразвука через электролит с погруженным в ванну анодом частоты и диапазон изменения токового сигнала значительно больше, чем эти же параметры без анода в электролите. Это означает, что полученный в первом случае сигнал не является обычной наводкой, вызванной работой ультразвукового генератора. Кроме того,

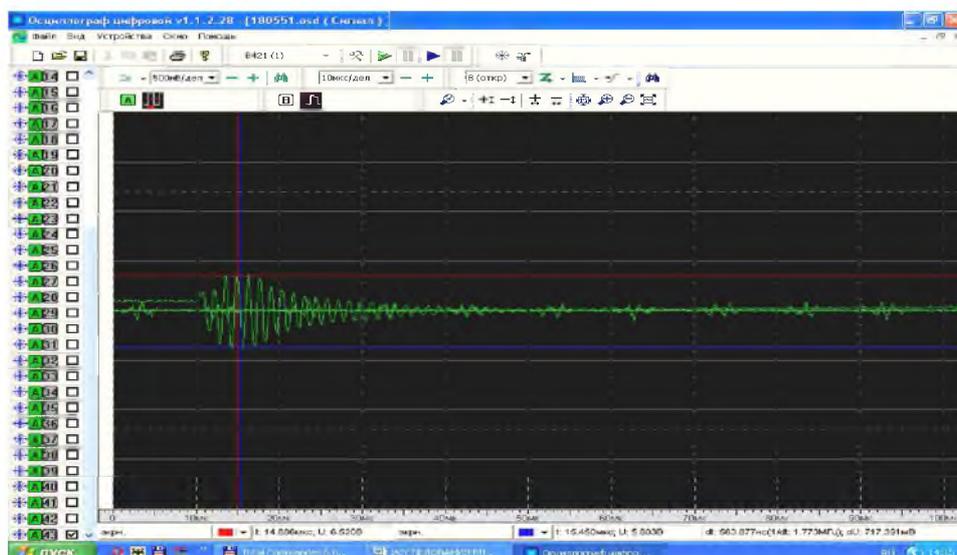
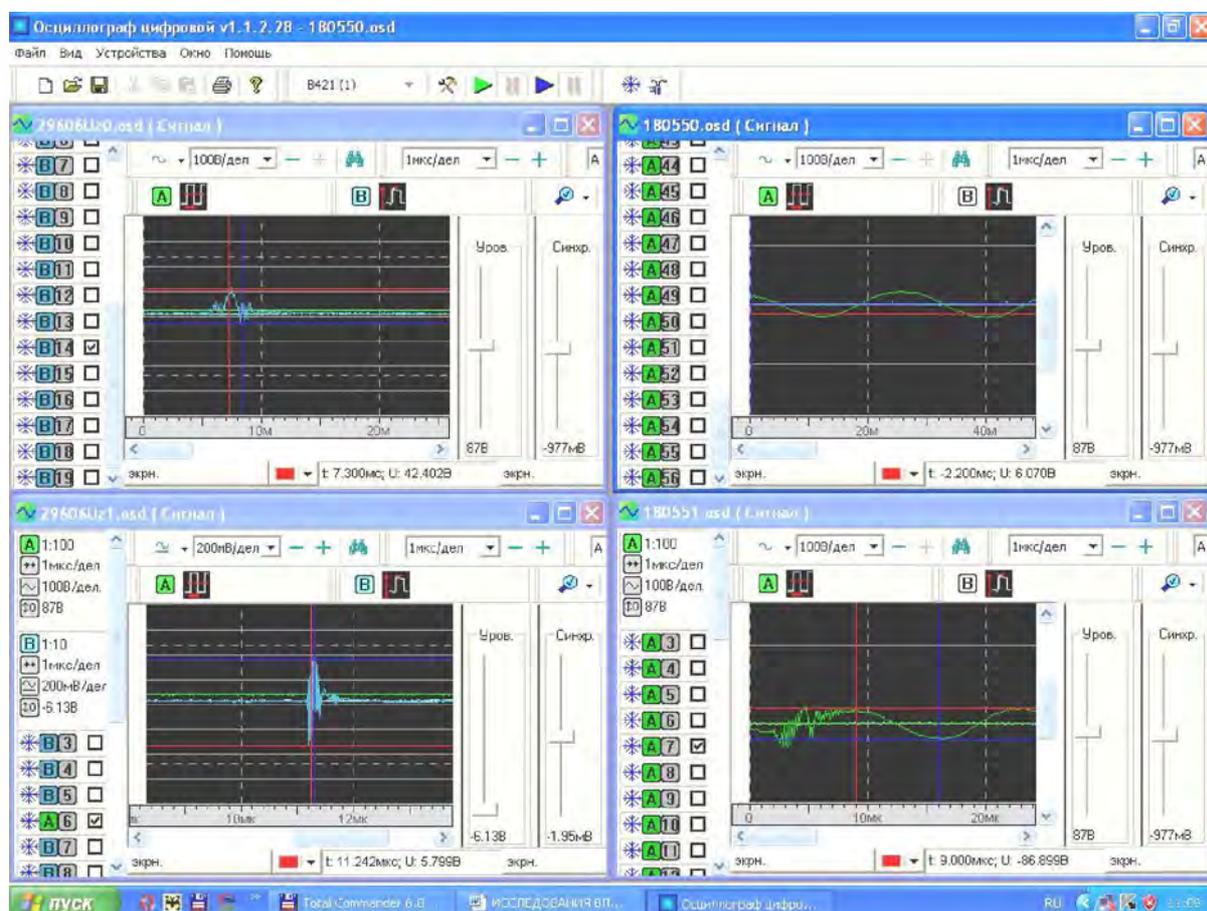


Рисунок 2 - Осциллограмма сигнала при пропускании УЗ через электролит при работе установки АМДО



а – единичный импульс

б – серия импульсов

Рисунок 3 - Осциллограммы тока при работе ультразвукового генератора в электролизной ванне с разной степенью развертки сигнала

при работающей установке АМДО с погруженным в ванну анодом в присутствии ультразвука импульсы тока следуют с частотой 83 кГц (рис. 4, а) и частотой в импульсе 93 МГц с диапазоном изменения сигнала 898 мВ (рис. 4, в), что отвечает величине тока в 12,6 А. Такой ток свидетельствует о том, что данный сигнал определяется протекающими в электролите процессами, а не является проявлением фоновых эффектов.

Аналогичный эксперимент, но без погружения анода в электролит, показал иную картину: импульсы тока следуют с частотой 8,3 Гц (рис. 4,б) и частотой в импульсе около 10 Гц, диапазон изменения сигнала составляет 370 мВ (рис. 4, г), т.е. ток в 2 раза меньше и составляет 5 А. Таким образом проявляется влияние состава анода на характер изменения электрических параметров процесса АМДО.

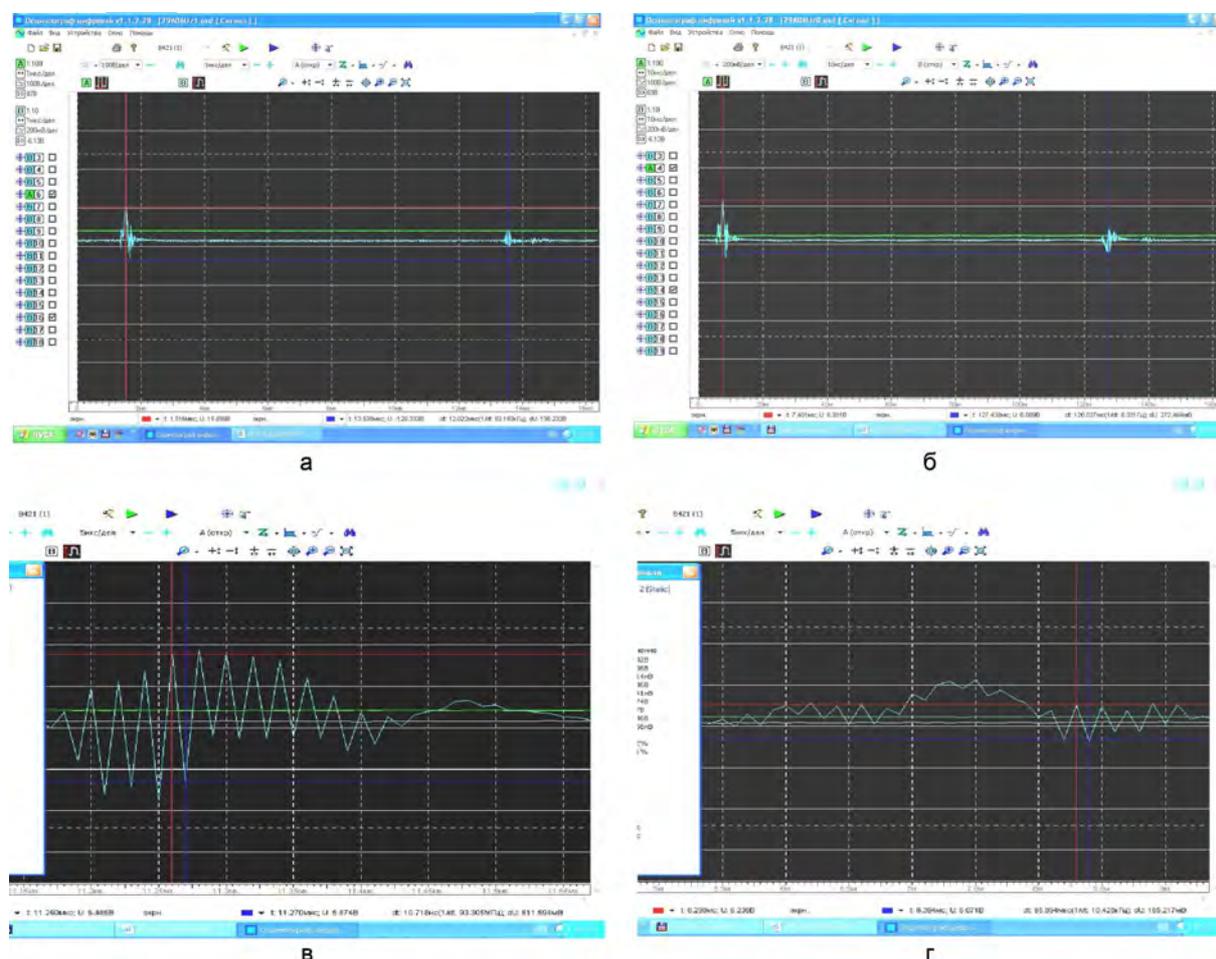


Рисунок 4 - Непериодические импульсы тока (а, б) и развертка импульса (в, г) при АМДО с погруженным в электролит анодом (а, в) и без него (б, г)

Влияние состава электролита при пропускании через него ультразвука при неработающей установке АМДО иллюстрируется тем, что в растворе возникают импульсные колебания с частотой, сравнимой с этим же параметром при автономной работе УЗ-генератора или серийной установки. Однако диапазон изменения сигнала и величины возникающих токов при этом различаются в 5 и 2 раза соответственно (табл. 1). Это свидетельствует о том, что механическая активация электролита обуславливает интен-

сификацию переноса носителей заряда, которыми прежде всего являются ионы электролита.

Таблица 1. Сводные данные результатов экспериментов по механической активации электролита при АМДО

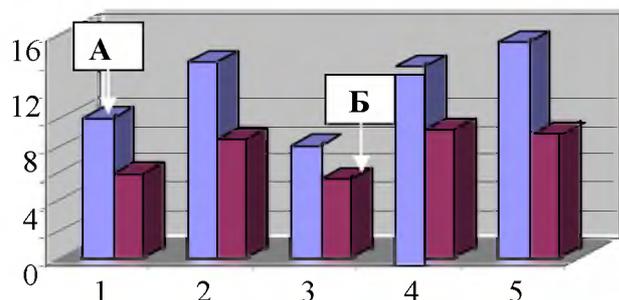
Эксперимент	Частота импульсов, кГц	Диапазон изменения сигнала, мВ	Величина тока, А
Автономный режим работы УЗ-генератора	2	150	2
Автономный режим работы установки МДО	2	350	5
Пропускание УЗ через электролит	2	700	10
Пропускание УЗ через электролит с погруженным анодом	8.3	898	12.6

Анализ полученной информации позволил заключить, что при пропускании через электролит ультразвуковых колебаний средняя высота импульсов напряжения увеличивается на 68 %, а импульсов тока — на 87 %, число импульсов тока и напряжения — на 90 %, приводя к появлению дополнительного энергетического импульса при микроплазменном воздействии на обрабатываемый материал и обуславливая, таким образом активацию процесса МДО, а значит, и интенсификацию микроплазменного синтеза керамико-подобных покрытий вентильных металлов.

Экспериментально сделанные выводы были подтверждены при погружении оксидируемой детали в активированный ультразвуком электролит. При этом наблюдался почти 4-х кратный рост частоты импульсов сигналов, свидетельствующий об уменьшении их амплитуды, и увеличившийся в 1,3 раза диапазон изменения импульсов по сравнению с этим же параметром при снятии осциллограммы в активированном растворе, но без анода. Данный эффект, связанный с появлением большего количества высокочастотных затухающих колебаний нерегулярной формы с высокой амплитудой по току (от 5 А и выше), можно объяснить возникновением синергетического эффекта, что приводит к оптимизации параметров АМДО и объясняет более интенсивное нарастание толщины покрытия.

При этом расчет средней скорости роста толщины покрытия показал, что для всех изучаемых сплавов при оксидировании без ультразвука этот параметр не превышает 0,7–0,75 мкм/мин, а при МДО с ультразвуком возрастает в 2,5 раза, доходя до 1,6–1,9 мкм/мин.

**Оксидируемые сплавы:** 1 – Д16Т; 2 - Al 93; – ВТ1- 0; 4 - ВТ6; 5 - Zr 635



А – с ультразвуком; Б – без ультразвука

Рисунок 5 - Средняя толщина покрытия, сформированного за фиксированный промежуток времени на поверхности вентильных сплавов

Иллюстрацией сказанного является гистограмма средней толщины покрытий после оксидирования различных вентильных металлов в электролите с ультразву-

ком и без него (рис. 5). Проведенными расчетами затрат энергии на формирование покрытия на поверхности сплава Д16 Т установлено, что процесс АМДО в активированном ультразвуком электролите менее энергоемок, чем в стандартном силикатно-щелочном растворе: энергозатраты на образование 1 мкм покрытия в таком электролите снижены в 2, 84 раза.

Разработанная технология ультразвуковой интенсификации микроплазменного синтеза керамикоподобных покрытий позволяет формировать в анодном режиме АМДО за технологически оправданное время слои работоспособных толщин на поверхности крупногабаритных изделий (рис. 6).



Рисунок 6 - Керамикоподобное покрытие на поверхности алюминиевых комплектующих расходомера

#### **Заключение.**

Таким образом, получена точная и исчерпывающая информация о влиянии ультразвуковой активации электролита на течение импульсных процессов при АМДО, зафиксирован эффект появления большего количества высокочастотных затухающих колебаний нерегулярной формы с высокой амплитудой по току (от 5 А и выше), который можно объяснить возникновением синергетического эффекта. Это приводит к оптимизации параметров АМДО и объясняет более интенсивное нарастание толщины покрытия при сниженных энергозатратах на его образование.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Катина, Л. В., О разрушительных эффектах кавитационного пузырька / Л. В. Катина, А. А. Кортнев, В. К. Макаров и др. // Акустика и ультразвуковая техника. Респ. межвед. науч.- техн. сб. – Москва, 1979. – вып. 14. – 190 с.
2. Гидеман, Е. Ультразвук / Е. Гидеман // Успехи физических наук. – М., 1986. – Т. 16. – вып. 5. – 656 с.
3. Патент 2601 от 15.12.05г. Способ и устройство контроля и управления кинетикой нарастания покрытий по продолжительности микроплазмоискровых воздействий / Н. М. Чигринова, В. Е. Чигринов, А. В. Дроздов
4. Чигринова, Н. М. Интенсификация процессов микроплазмоискрового упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности электромеханическим воздействием: дис. ... д-р техн. наук / Н. М. Чигринова – Минск: Октябрь, 2010. - 310 с. [с прилож. на 265 с.].
5. Чигринова, Н. М., Перспективы применения автоматизированных информационно-измерительных систем для управления и оптимизации электрофизических параметров микроплазмоискровых технологий / Н. М. Чигринова, В. Е. Чигринов, А. В. Дроздов // Международная конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности –2005». – С.-Петербург, Россия.

Поступила в редколлегию 09.03.2017 г.