

УДК 347.779

РОЛЬ КАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКТИВАЦИИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Чигринова Наталья Михайловна, д-р техн. наук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Тел.+375-17-293-95-81; E-mail: chygrynova@yandex.by

Аннотация. В статье предложен алгоритм моделирования роста и коллапса кавитационных пузырьков при микродуговом оксидировании (МДО) в результате пропуска через электролит ультразвуковых колебаний и приведены данные оптимизационных расчетов всех параметров активированного процесса. Изложенные в предыдущем исследовании теоретические представления о факторах, определяющих образование оксидного слоя на поверхности, оксидируемой в процессе активируемого ультразвуком МДО, обусловили выбор кавитационной модели, как основного механизма интенсификации процесса нарастания и стабилизации структуры формируемых оксидных слоев. Предложенная модель образования и роста кавитационных пузырьков в активированном ультразвуком электролите позволяет рассчитать и оптимизировать основные параметры процесса АМДО, ответственные за получение оксидных покрытий с прогнозируемыми характеристиками.

Ключевые слова: анодное микродуговое оксидирование, ультразвуковая активация, электролит, кавитационные пузырьки, коллапс, оксидный слой

THE ROLE OF CAVITATION EFFECTS IN ULTRASONIC MICRO-ARC OXIDATION ACTIVATION

Natalia M. Chigrinova, D. Eng

Abstract. The article proposes a method for determining the growth and collapse of cavitation bubbles during micro-arc oxidation (MAO) induced by the transmission of ultrasonic vibrations through the electrolyte; it also presents data on the optimization of calculations for all parameters of the activated process, based on results obtained in the previous stage. The theoretical concepts outlined in regarding the factors governing oxide layer formation on a surface undergoing ultrasonic-activated micro-arc oxidation (MAO) led to the selection of a cavitation model as the primary mechanism for intensifying the growth process and stabilizing the structure of the resulting oxide layers. The proposed model of cavitation bubble formation and growth in an ultrasound-activated electrolyte enables the calculation and optimization of the key parameters of the AMDO process responsible for producing oxide coatings with predictable characteristics.

Keywords: anodic micro-arc oxidation, ultrasonic activation, electrolyte, cavitation bubbles, collapse, oxide layer.

Введение

В нашем предыдущем исследовании указывалось, что предпосылкой для выбора ультразвуковой интенсификации процесса АМДО как способа, ускоряющего протекание электрохимических реакций в электролите, являются кавитационные эффекты, наблюдаемые в жидкости при пропускании через нее ультразвуковых колебаний определенной

интенсивности [1]. Отмечалось, что при прохождении ультразвуковой волны в электролите происходят пульсации: расширение (отрицательное давление) и сжатие (положительное давление). Если интенсивность (амплитуда) звукового поля достаточно высока, то ультразвук может вызвать образование, рост и быстрое сжатие пузырьков насыщенного пара. Пузырьки, попадая в область повышенного давления, схлопываются (конденсируются) кумулятивными струйками в точки. В таких многочисленных локальных областях кумулятивные эффекты приводят к точечному кратковременному (длительностью $\sim 10^{-6}$ с) повышению давлений до десятков тысяч атмосфер, с образованием точечных температур в десятки тысяч градусов [2, 3]. Схлопывание (коллапс) сжимающегося пузырька приводит также к локализованному мощному выделению тепловой энергии, интенсифицируя таким образом протекание высокоэнергетических химических процессов [4,5]. Энергия схлопывающихся пузырьков расходуется не только на излучение ударных волн, но и на локальный нагрев газа, содержащегося в сжимающихся кавитационных полостях, на образование свободных радикалов, приводящих к более интенсивному протеканию химических реакций, ускоряющих процесс роста оксидных слоев. При этом твердые частицы в растворе диспергируются до микронного уровня и служат новыми центрами зарождения пузырьков [4, 6]. Происходит также гомогенизация обрабатываемого продукта, что способствует улучшению качества формируемого при АМДО покрытия [7].

Эти явления послужили предпосылкой для выбора ультразвуковой интенсификации процесса АМДО как одного из основных приемов, активизирующих процесс образования и скорость роста оксидных покрытий и ответственного за получение слоев с прогнозируемыми характеристиками.

Цель исследования состоит в оптимизации режимов ультразвукового воздействия и параметров электролита на динамику образования и роста формируемых при ультразвуковой активации электролита оксидных слоев.

Решаемые задачи:

1. Разработка алгоритма целенаправленного поиска условий, управляющих процессом активации микродугового оксидирования;
2. Определение параметров внешнего ультразвукового воздействия (частоты и амплитуды), обеспечивающих необходимое выделение энергии при коллапсе пузырьков кавитационного происхождения;
3. Анализ зависимости отношения максимального радиуса кавитационного пузырька, с которого он начинает коллапсировать, от параметров внешнего ультразвукового воздействия – амплитуды A и частоты f ультразвука;
4. Изучение зависимости отношения максимального радиуса кавитационного пузырька, от его начального радиуса, определяемого типом и размером зародышей оксидной фазы;
5. Исследование зависимости отношения максимального радиуса кавитационного пузырька от параметров электролита.

1. Основное содержание и результаты работы.

Решение поставленных задач и численные расчеты проводились с использованием модели Рэлея–Плессе и ее модификации Келлера–Миксиса–Парлица (уравнения (2.29) – (2.30) [7-10] в среде пакета Mathematica. В расчетах приняты стандартные физические константы, относящиеся к явлениям в электролите [11,12]: коэффициент поверхностного натяжения $S=0,073$ Дж/м², динамическая вязкость $\eta=0,9$ П, плотность $\rho=0,998$

г/см³, скорость звука $c = 1500 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, давление насыщенного пара $p_s = 2,34 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$, внешнее давление $p_{\text{stat}} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Как показано ранее, плотность выделяемой энергии пропорциональна величине $(R_{\text{max}}/R_0)^3$, однако, это отношение зависит от физических свойств раствора, начального радиуса пузырька R_0 , который, в свою очередь, определяется условиями зародышеобразования пузырьков, т.е. природой и размером центров их зарождения и их статистическим распределением по размерам.

Результаты вариационных расчетов зависимостей R/R_0 от частоты f внешнего ультразвукового воздействия в режиме реального времени при фиксированных значениях R_0 и амплитуде давления ультразвуковых колебаний A приведены на рисунке 1.

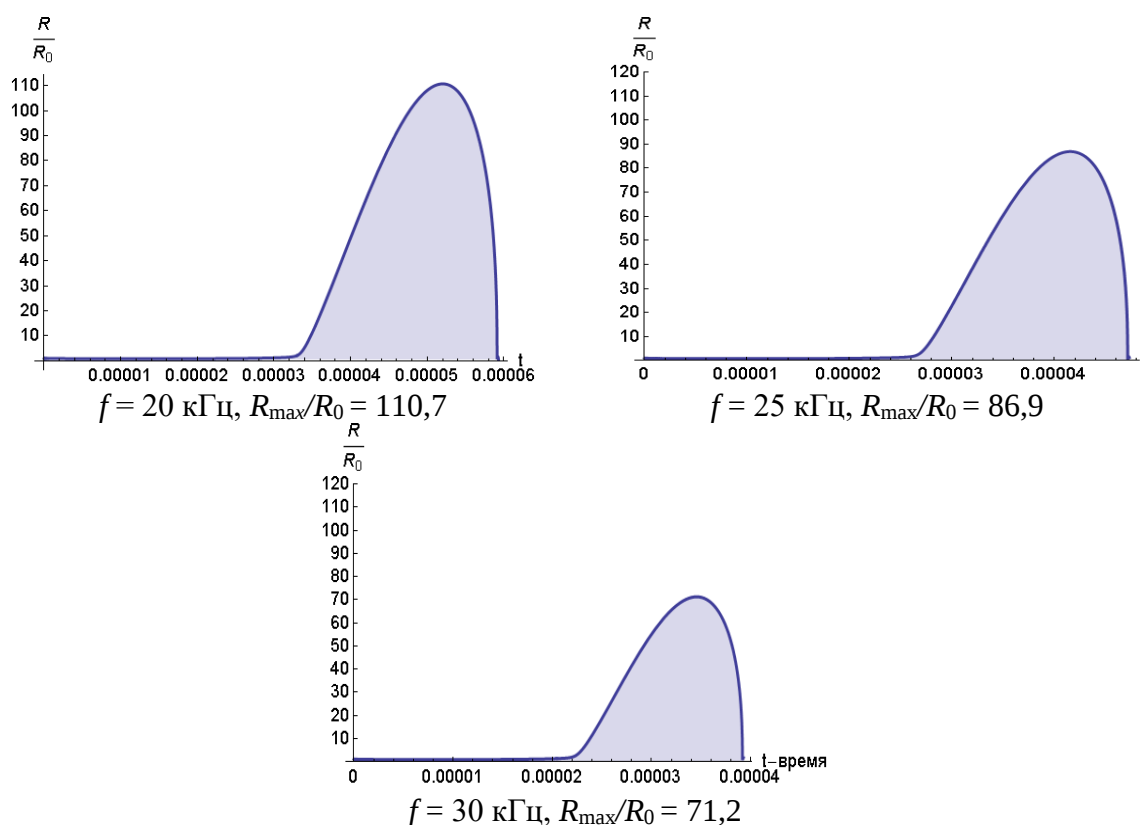


Рисунок 1. Зависимости $R(t)/R_0$ от частоты ультразвуковых колебаний при $R_0 = 1 \text{ мкм}$ и $A = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$

Из приведенных графиков отчетливо видна зависимость R_{max}/R_0 от изменения ультразвуковой частоты f : величина R_{max}/R_0 уменьшается почти в 1,5 раза при увеличении частоты от 20 до 30 кГц. Этот вывод подтверждается кривой зависимости R_{max}/R_0 от частоты f при стандартных значениях $R_0 = 1 \text{ мкм}$ и $A = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (рисунок 2). Результаты, представленные на рисунке 2, показывают, что сильная зависимость отношения R_{max}/R_0 от частоты наблюдается в начале ультразвукового диапазона частот – примерно до 40 кГц, с последующим монотонным падением.

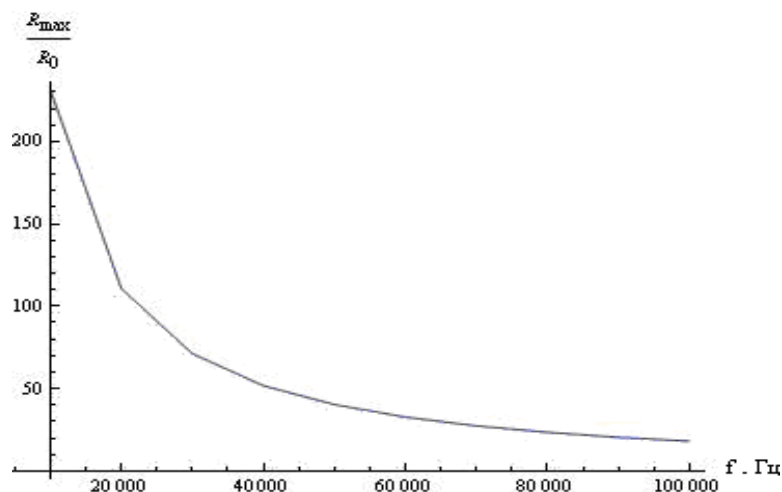


Рисунок 2. Зависимость $R_{\max}/R_0$ от частоты f ультразвуковых колебаний при $R_0 = 1$ мкм и $A = 2,0 \cdot 10^5$ Па

Звуковое поле в жидкости, вызывающее кавитацию, особенно в результате ее наполнения дополнительными химическими и прочими ингредиентами, как в электролите при АМДО [13], неоднородно по пространству. Это приводит к тому, что наряду с пульсациями, пузырек движется в жидкости поступательно.

Зависимости $R(t)/R_0$ от f при фиксированных R_0 , но при более высокой амплитуде давления ультразвуковой волны $A = 3 \cdot 10^5$ Па, иллюстрируются рисунком 3.

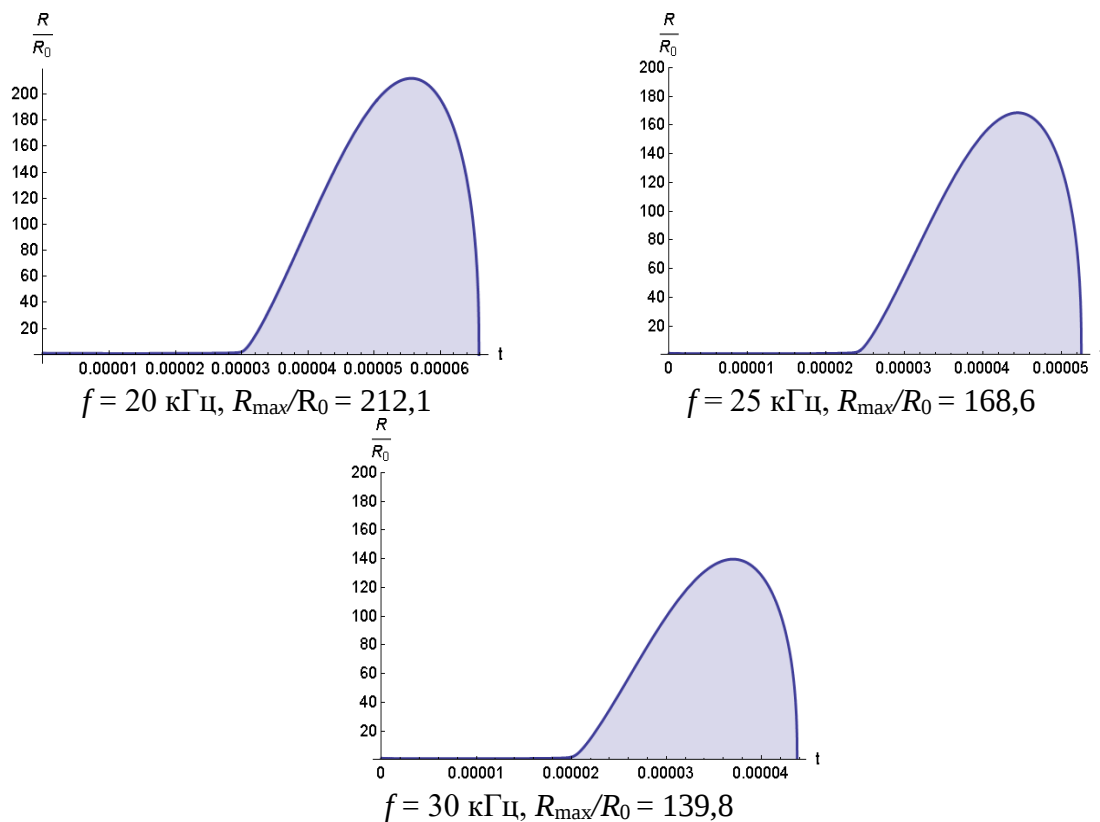


Рисунок 3. Зависимости $R(t)/R_0$ от частоты ультразвуковых колебаний при более высокой амплитуде давления $A = 3,0 \cdot 10^5$ Па ($R_0 = 1$ мкм)

Анализ графиков на рисунках 1 и 3 показывает, что увеличение A в 1,5 раза (от $2,0 \cdot 10^5$ Па до $3,0 \cdot 10^5$ Па) при одинаковых f приводит к возрастанию отношения $R_{\max}/R_0$ почти в 2 раза, что подтверждается данными кривой зависимости $R_{\max}/R_0$ от A (рисунок 4). Обратный характер кривой зависимости $R_{\max}/R_0$ от амплитуды давления дает возможность оптимизировать параметры A и f ультразвукового воздействия, при которых обеспечивается заданный уровень отношения $R_{\max}/R_0$ для контролируемого управления интенсивностью процесса АМДО.

Еще один параметр, с помощью которого можно управлять процессом АМДО и контролировать его, – начальный радиус кавитационного пузырька, определяемый условиями его зародышеобразования, в частности, наполненностью электролита дополнительными ингредиентами, имеющими электрический заряд (рисунок 4) [13].

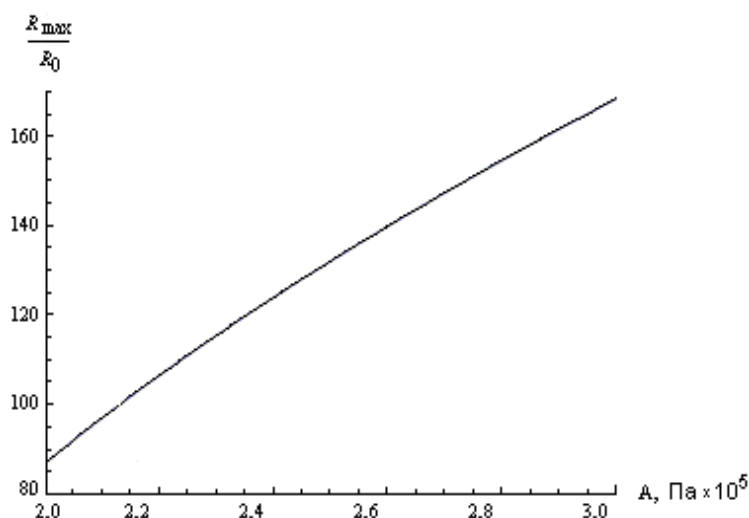


Рисунок 4. Зависимость $R_{\max}/R_0$ от амплитуды давления A ультразвукового воздействия при значениях $R_0 = 1$ мкм и $f = 25$ кГц

Рисунок 5 иллюстрирует влияние начального радиуса пузырька на изменение $R_{\max}/R_0$ при разных значениях частоты и амплитуды давления ультразвуковых колебаний.

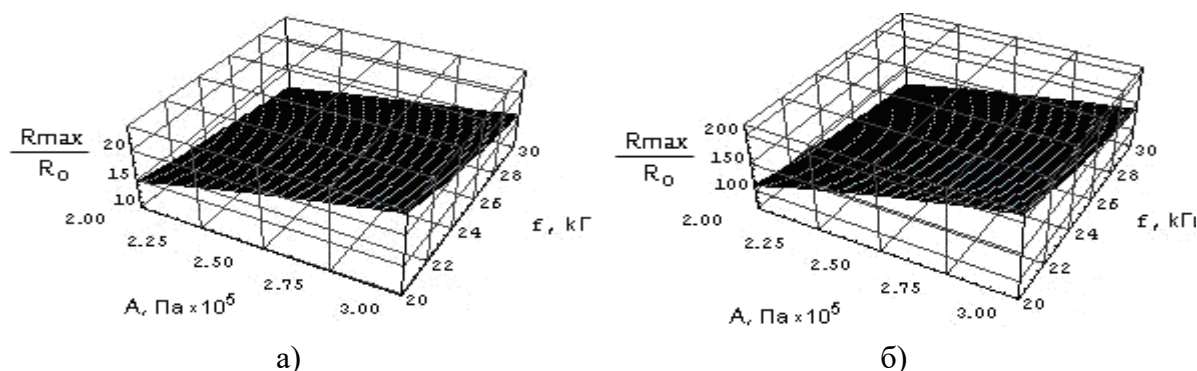


Рисунок 5. Зависимость $R_{\max}/R_0$ от частоты f и амплитуды давления A ультразвукового воздействия при разных значениях начального радиуса пузырька R_0 : 10 мкм (а) и 1 мкм (б)

В таблице 1 приведены сводные данные, полученные на основании результатов, представленных на рисунках 2 и 4, из которой следует, что увеличение A в 1,5 раза в

указанном диапазоне f приводит к существенному увеличению энергии, выделяющейся при коллапсе кавитационных пузырьков.

Таблица 1. Зависимость $R_{\max}/R_0$ от амплитуды давления и частоты ультразвукового воздействия при фиксированном значении $R_0 = 1 \text{ мкм}$

$A, \text{ Па}$	$f, \text{ кГц}$		
	20	25	30
$2,0 \cdot 10^5$	110,7	86,9	71,2
$3,0 \cdot 10^5$	212,1	168,6	139,8

Рисунок 6 иллюстрирует зависимость $R_{\max}/R_0$ от начального радиуса пузырька R_0 при фиксированных значениях амплитуды и частоты ультразвукового воздействия. Результаты расчетов, приведенные на данном рисунке, показывают, что максимальное соотношение $R_{\max}/R_0$ проявляется в достаточно узком, но реальном с точки зрения практической реализации, диапазоне изменения радиуса пузырька в активированном ультразвуком электролите R_0 : 1–3 мкм.

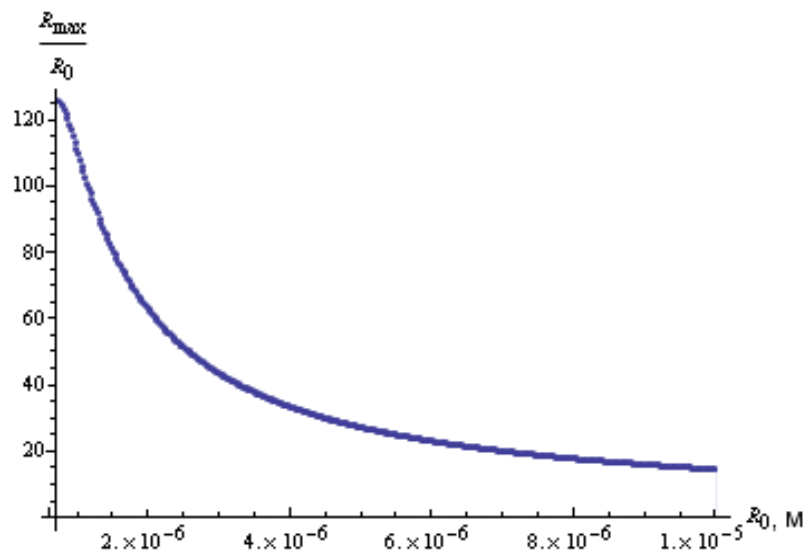


Рисунок 6. Зависимость $R_{\max}/R_0$ от R_0 при фиксированных значениях $A = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и $f = 20 \text{ кГц}$ ультразвука

Эта величина характеризует высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных, поскольку размеры частиц дополнительно вводимых заряженных частиц в электролит при электрической интенсификации – наиболее вероятных центров зарождения кавитационных пузырьков, являются величинами того же порядка [13].

Следует отметить роль размера начального радиуса кавитационных пузырьков при оценке энергии, выделяющейся при их коллапсе. С одной стороны, чем меньше R_0 частицы, тем больше отношение $R_{\max}/R_0$, т.е. выше уровень выделяющейся энергии. С другой – плотность энергосвободного выделения в более мелких пузырьках существенно ниже, поскольку количество частиц в паровой фазе коллапсирующего пузырька, обуславливающих мощное выделение энергии, заметно меньше. Это объясняется зависимостью, связывающей плотность N_0 этих частиц с радиусом пузырька: $N_0 \sim (R_0)^{1/3}$.

Трансляционное (поступательное) движение пузырьков является причиной коагуляционного механизма их роста, а скорость этого движения пузырьков, находящихся в ультразвуковом поле со звуковым давлением P_a , зависит также от свойств жидкости – коэффициентов кинематической вязкости и поверхностного натяжения [12].

Как видно из исходного уравнения Рэлея–Плессе, уровень выделяемой энергии зависит не только от параметров внешнего ультразвукового воздействия, начального размера кавитационного пузырька. Энергетический уровень определяется состоянием и свойствами электролита (его плотностью ρ и вязкостью μ), а также внешним давлением p_{stat} .

На рисунках 7 и 8 представлены зависимости R_{max}/R_0 от ρ , μ , p_{stat} при $A = 2,0 \cdot 10^5$ Па, $f = 20$ кГц и номинальных значениях плотности и вязкости водно-щелочного раствора: $\rho = 0,998$ г/см³, $\mu = 0,9$ П и $p_{stat} = 10^5$ Па [14,15].

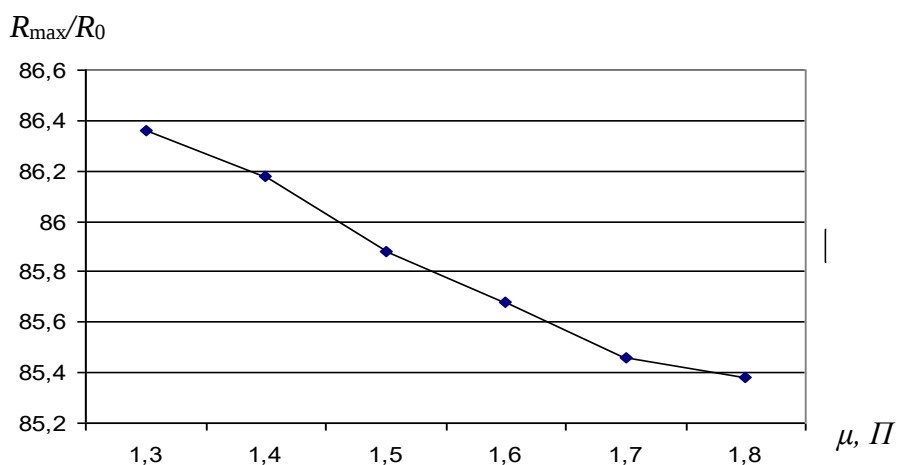


Рисунок 7. Зависимость R_{max}/R_0 от вязкости электролита μ при $A = 2,0 \cdot 10^5$ Па, $f = 20$ кГц, $R_0 = 1$ мкм

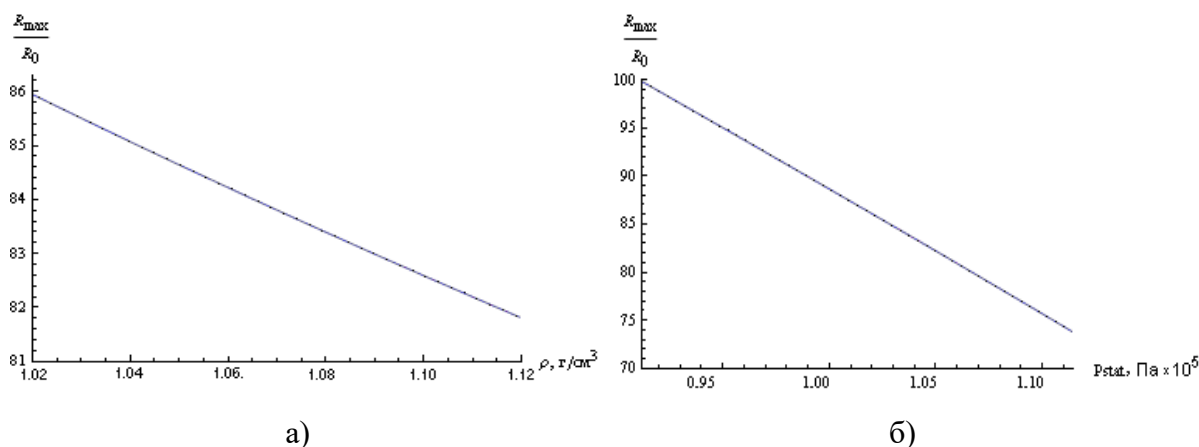


Рисунок 8. Зависимость R_{max}/R_0 от плотности электролита ρ (а) и от внешнего давления p_{stat} . (б) при $A = 2,0 \cdot 10^5$ Па, $f = 20$ кГц, $R_0 = 1$ мкм

В таблице 2 приведены данные для плотности и вязкости электролита в зависимости от уровня его кислотности.

Таблица 2. Плотность и вязкость электролита в зависимости от реального уровня его кислотности.

Параметр	Среда		
	нормальная	кислотная (20%-ная H_2SO_4)	щелочная (10%-ная $NaOH$)
ρ , г/см ³	0,998	1,15	1,25
μ , П	0,9	1,38	1,86

Данные из таблицы 2 показывают, что интенсификация процесса АМДО посредством пропускания через электролит ультразвуковых волн возможна в растворах с достаточно широким диапазоном изменения их состояния – плотности ρ (от 0,998 г/см³ до 1,25 г/см³) и вязкости μ (от 0,9 П до 1,86 П), а также состава, определяемого, в частности, уровнем кислотности. Это позволяет (см. соответствующие графики на рисунках 7 и 8) целенаправленно осуществлять выбор типа и состава электролита для управления интенсивностью выделяемой энергии при схлопывании пузырьков кавитационного происхождения, обуславливая интенсивность процесса АМДО и рост оксидного слоя.

Оптимизация параметров данной многофакторной задачи связана с определением диапазона изменения входных факторов (плотность и вязкость электролита, внешнее давление), в котором выходная характеристика $R_{\max}/R_0$, будет изменяться в заданном интервале. Задача решалась в приближении поверхности откликов (Response Surface Methodology, RSM) [16,17]. Главной составной частью этого приближения является получение полинома, аппроксимирующего зависимость выходной характеристики от входных факторов. На рисунках 9 и 10 приведены многомерные зависимости $R_{\max}/R_0$ в области значений $R_{\max}/R_0=100\pm10\%$ и $R_{\max}/R_0=300\pm15\%$ в пространстве (A, ρ) , (A, μ) и (A, p_{stat}) , полученные с использованием полиномиальной зависимости $R_{\max}/R_0$ от ρ , μ и p_{stat} , рассчитанной по RSM методологии. Полученная аппроксимационная зависимость (коэффициент корреляции равен 0,99) позволила определить допустимые интервалы изменения параметров ρ , μ и p_{stat} в состоянии электролита, обеспечивающие изменение величины $R_{\max}/R_0$ в заданном диапазоне.

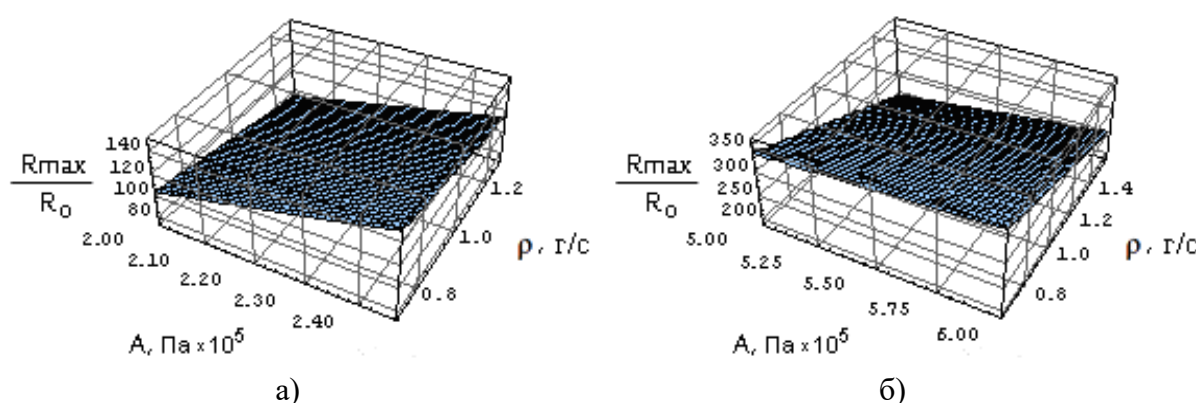


Рисунок 9. Зависимость $R_{\max}/R_0$ в области значений $100\pm10\%$ (а) и $300\pm15\%$ (б) от амплитуды давления A ультразвука и плотности электролита ρ ($f = 25$ кГц, $R_0 = 1$ мкм, $\mu = 0,9$ П и $p_{\text{stat}} = 10^5$ Па)

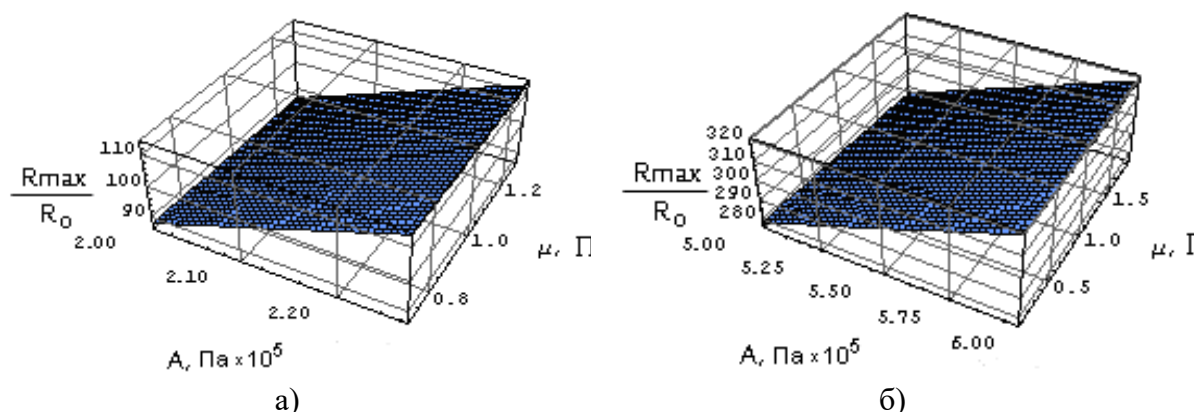


Рисунок 10. Зависимость $R_{\max}/R_0$ в области значений $100\pm 10\%$ (а) и $300\pm 15\%$ (б) от амплитуды давления A ультразвука и вязкости электролита μ ($f = 25$ кГц, $R_0 = 1$ мкм, $\rho = 0,998$ г/см³ и $p_{\text{stat}} = 10^5$ Па)

В таблице 3 приведены результаты двух оптимизационных расчетов, отличающихся заданной величиной (100 и 300) и диапазоном разброса ($\pm 10\%$ и $\pm 15\%$) выходной величины $R_{\max}/R_0$. Следует отметить, что достижение величины $R_{\max}/R_0 = 300$ возможно лишь при использовании ультразвукового воздействия с A в диапазоне $5 \cdot 10^5$ Па – $6 \cdot 10^5$ Па бар (см. рисунки 9, б; 10, б и 11, б).

Таблица 3. Результаты решения оптимизационной задачи определения допустимого разброса входных факторов ρ , μ и p_{stat} , обеспечивающих заданную величину и диапазон изменения выходного параметра $R_{\max}/R_0$

№ п/п	$R_{\max}/R_0$	Допустимые изменения входных параметров		
		ρ , г/см ³	μ , П	p_{stat} , Па
	$100\pm 10\%$	0,699 – 1,297	0,71 – 1,32	$(0,80 – 1,32) \cdot 10^5$
	$300\pm 15\%$	0,634 – 1,567	0,53 – 1,05	$(0,50 – 1,90) \cdot 10^5$

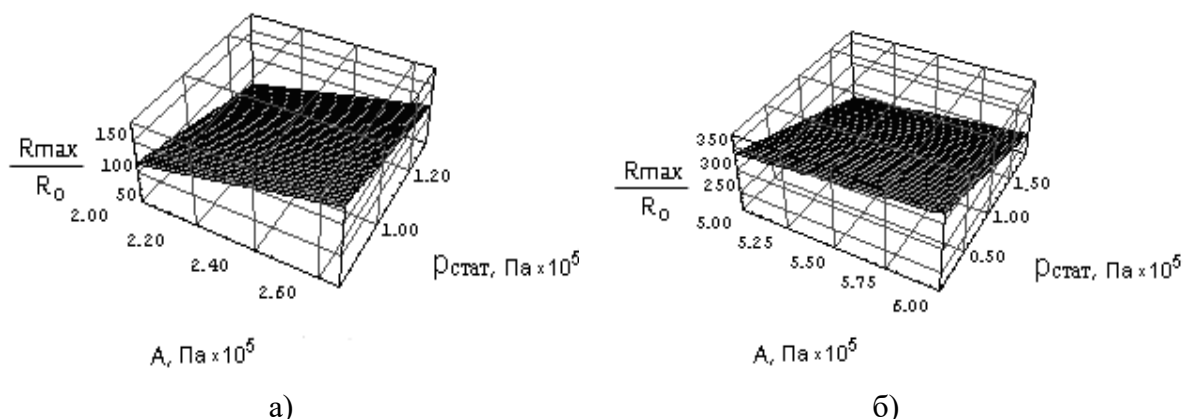


Рисунок 11. Зависимость $R_{\max}/R_0$ в области значений $100\pm 10\%$ (а) и $300\pm 15\%$ (б) от амплитуды давления A ультразвука и внешнего давления p_{stat} ($f = 20$ кГц, $R_0 = 1$ мкм, $\rho = 0,998$ г/см³ и $\mu = 0,9$ П)

Сравнение данных, представленных в таблицах 2 и 3, позволяет сделать вывод, что для двух приведенных примеров решения оптимизационной задачи полученный диа-

пазон допустимых изменений вязкости (0,634–1,567) П для $R_{\max}/R_0 = 300 \pm 15\%$ укладывается в диапазон ее возможных (в зависимости от степени кислотности раствора) значений (0,9 – 1,86) П, чего нельзя сказать о плотности электролита: соответствующие диапазоны изменения ρ – (0,634 – 1,567) г/см³ и (0,998 – 1,25) г/см³.

Заключение

С учетом полученных в результате решаемых в исследовании задач данных, изучены механизмы, определяющие роль кавитационных эффектов в изменении динамики микродуговых процессов под влиянием предложенного электромеханического воздействия и показана определяющая роль комбинаций различных видов энергии, действующих на материал. Проанализированы механизмы и выявлены параметры, управляющие процессом выделения энергии при схлопывании газовых пузырьков, образовавшихся в электролите при ультразвуковом воздействии. С использованием методологии поверхности откликов решена многофакторная задача управления динамикой кавитационных процессов под действием ультразвука на процесс АМДО и установлен оптимальный диапазон параметров ультразвуковой волны, определяющей интенсивность и мощность выделяемой при коллапсе кавитационного пузырька энергии. Проведен численный анализ влияния внешних (амплитуда давления и частота ультразвукового воздействия, внешнее давление) и внутренних (плотность и вязкость электролита, величина начального радиуса пузырька, соответствующая размерам вводимых в раствор электрозаряженных частиц) факторов на процесс формирования покрытий прогнозируемого качества.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чигринова, Н. М. Сонолюминисценция как основа теории ультразвуковой активации процесса микродугового оксидирования /Н. М. Чигринова // Международный сборник «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». - №1(92) (2026). - Россия, Донецк, С. 69-79.
2. Линник, А. Ю. Явление кавитации /А. Ю. Линник // Естеств. и техн. науки. – №3(35). 2008.Россия, с.372-376.
3. Сиротюк, М. Г. Акустическая кавитация. /М. Г. Сиротюк //М. Наука. – Россия, 2008
4. Голых, Р. Н. Повышение эффективности ультразвукового кавитационного воздействия / Р. Н. Голых // Дисс. на соискание уч. степ. канд. техн.наук.– Россия.–Бийск.–2014. <http://www.bti.secna.ru/nauka/docs/dissertac-pred/golyh.pdf>
5. Ламекин, Н. С. Кавитация: теория и применение /Н. С. Ламекин //Гос. нац. рус. акад. М. Русаки. – 2000, 246 с.
6. Аникин, В. С., Аникин, В. В. Моделирование гидродинамических вихревых потоков с ультразвуковыми кавитационными процессами / В. С. Аникин и др. // Вестн. Рязан. гос. радиотехн. ун-та. №2 (вып.24). 2008, с.61-66.
7. Чигринова, Н. М., Нелаев, В. В., Кулещов, А. А. Физическая модель энергетической активации процесса анодного микродугового оксидирования. /Н. М. Чигринова и др. // ИФЖ, Том 82, № 5. С.1004–1013. Минск. 2009.
8. Diaz de la Rosa, M. A. High-frequency ultrasound drug delivery and cavitation / M. A. Diaz de la Rosa // Master thesis, Brigham Young University. – 2007. – 117 pp.
9. Suslick, K. S. Upper Bound for Neutron Emission from Sonoluminescing Bubbles in Deuterated acetone / K. S. Suslick [et al.] // Physical Review Letters. – 2007. – Vol.98, № 9. – P. 625–628.

10. Parlitz, U. Robust method for experimental bifurcation analysis / U. Parlitz // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2002. – № 12(8). – P. 1909–1913.
11. Бабичев, А. П., Бабушкина, Н.А., Братковский, А. М Физические величины: Справочник./ А.П.Бабичев и др.; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова // М.: Энергоатомиздат, 1991, — 1232 с. — ISBN 5-283-04013-5
12. Яблонский, А. А., Норенко, С. С. Курс теории колебаний / А. А. Яблонский и др., – Санкт-Петербург-Москва-Краснодар: Лан, 2003. – 247 с.
13. Чигринова, Н. М. Интенсификация процессов микроплазменного упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности электрохимическим воздействием /Н. М. Чигринова // Дисс. на соискание уч. степени докт. техн. наук. – Минск, 2010, 310 с. с приложениями на 265 с.
14. Кнэпп, Р., Дейли, Дж., Хэммит, П. Кавитация: Пер. с англ. / Р. Кнэпп и др. // Мир. 1974, 688 с.
15. Diaz de la Rosa, M. A. High-frequency ultrasound drug delivery and cavitation / M. A. Diaz de la Rosa // Master thesis, Brigham Young University. – 2007. – 117 pp.
16. Koulesoff A. A., Nelayev V. V. New approach for the response surface methodology / A. A. Koulesoff и др. // *Proc. SPIE*, Vol. 4348, 2001.- P. 435-439.
17. Chigrinova N. M. Setting up a system and an algorithm of adaptive control in regime of real time with electrolyte flows during formation of oxide-ceramic coatings / N. M. Chigrinova // *Jornal of SPIE: Nanodesign, Technology, and Computer Simulation*. – USA, 2004. – Vol. 6597,65971A-5.

REFERENCES

1. Chigrinova, N. M. Sonoluminescence as the basis of the theory of ultrasonic activation of the microarc oxidation process /N. M. Chigrinova // *International collection "Progressive technologies and systems of mechanical engineering"*. - №1(92) (2026). - Russia, Donetsk, pp. 69-79.
2. Linnik, A. Y. The phenomenon of cavitation /A. Y. Linnik // *Natural Sciences. and technical sciences*. –№3(35). 2008.Russia, pp.372-376.
3. Sirotiyuk, M. G. Acoustic cavitation. /M. G. Sirotiyuk //M. Science. – Russia, 2008
4. Golykh, R. N. Improving the effectiveness of ultrasonic cavitation exposure / R. N. Golykh // Diss. for the academic degree. Candidate of Technical Sciences.– Russia.– Biysk.- 2014. <http://www.bti.secna.ru/nauka/docs/dissertac-pred/golyh.pdf>
5. Lamekin, N. S. Cavitation: theory and application /N. S. Lamekin //State National Russian Academy of Sciences M. Rusaki. - 2000, 246 p.
6. Anikin, V. S., Anikin, V. V. Modeling of hydrodynamic vortex flows with ultrasonic cavitation processes / V. S. Anikin et al. // *Vestn. Ryazan State Radio Engineering The university*. No. 2 (issue 24). 2008, pp.61-66.
7. Chigrinova, N. M., Nelaev, V. V., Kuleshshov, A. A. A physical model of the energetic activation of the anodic microarc oxidation process. /N. M. Chiranova et al. // *IFZH*, Volume 82, No. 5. pp. 1004-1013. Minsk. 2009.
8. Diaz de la Rosa, M. A. High-frequency ultrasound drug delivery and cavitation / M. A. Diaz de la Rosa // Master's thesis, Brigham Young University. – 2007. – 117 p.
9. Suslik, K. S. The upper limit of neutron emission from sonoluminescent bubbles in deuterated acetone / K. S. Suslik [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2007. – Vol. 98, No. 9. – pp. 625-628.
10. Parlitz, U. Reliable method of experimental analysis of bifurcations / U. Parlitz // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2002. – № 12(8). – Pp. 1909-1913.

11. Babichev, A. P., Babukina, N.A., Bratkovsky, A.M. Individuals: a handbook/ A.P. Babichev et al.; edited by I. S. Grigorev, E. Z. Meilikhov // Moscow: Elektroizdat, 1991, — 1232 p. — ISBN 5-283-04013-5
12. Yablonsky, A. A., Norenko, S. S. Course of the theory of oscillations / A. A. Yablonsky et al., — St. Petersburg-Moscow-Krasnodar: Lan, 2003. — 247 p.
13. Chigrinova, N. M. Intensification of microplasma spark hardening and restoration of metal products of increased precision by electro-mechanical action /N. M. Chigrinova // Diss. for the academic degree of doctor. Technical sciences. — Minsk, 2010, 310 p. with appendices for 265 p.
14. Knapp, R., Daly, J., Hammitt, P. Cavitation: Translated from English / R. Knapp et al. //Mir. 1974, 688 p.
15. Diaz de la Rosa, M. A. High-frequency ultrasound drug delivery and cavitation / M. A. Diaz de la Rosa // Master's thesis, Brigham Young University. — 2007. — 117 p.
16. Kulesoff A. A., Nelaev V. V. A new approach to the methodology of the response surface / A. A. Kulesoff et al. // / SPIE, volume 4348, 2001. - pp. 435-439.
17. Chigrinova, N. M. Creation of a system and algorithm for adaptive control in real time of electrolyte flows during the formation of oxide-ceramic coatings / N. M. Chigrinova // SPIE Journal: Nanodesign, technologies and computer modeling. — USA, 2004. — Volume 6597,65971A-5.

Статья поступила в редакцию 05.03.2026; одобрена после рецензирования 19.03.2026; принята к публикации 31.03.2026.

The article was submitted March 5, 2026; approved after reviewing March 19, 2026; accepted for publication March 31, 2026.