

С.Ш. ХАЛИК¹, Ш.Р. КУРБАНБЕКОВ²

¹ЖШС «Инновациялық технологиялар және жаңа материалдар институты»
(Қазақстан Түркістан қ.), e-mail: halyksaida@gmail.com

²PhD, Қ.А.Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінің қауымдастырылған
профессоры (Қазақстан Түркістан қ.), e-mail: sherzod.Kurbanbekov@ayu.edu.kz

ЭЛЕКТРОЛИТ-ПЛАЗМАЛЫҚ ӨНДЕУ ПРОЦЕСІНДЕ БУ-ГАЗ ҚАБЫҒЫНЫҢ ВОЛЬТ-АМПЕРЛІК ХАРАКТЕРИСТИКАСЫН МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа. Электродиттік плазманы өңдеу (ЭПӨ) - плазма мен электродиттік ерітіндіні қолдануға негізделген материалдардың бетін өңдеу әдісі. Бұл мақалада ЭПӨ-ның жұмыс принципі, негізгі қолданбалары және ықтимал артықшылықтары талқыланады. ЭПӨ әдісі өңделетін объектіні электродиттік ерітіндіге батыруды қамтиды, содан кейін ерітіндінің ыдырауын және өңделетін материалдың бетінде плазмалық бұлттың пайда болуын тудыратын электр тогы қолданылады. Плазманың және ерітіндінің химиялық белсенді компоненттерінің әсері материалдың бетін өзгертуге, оның адгезиясы, беріктігі және коррозияға төзімділігі сияқты қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді. ЭПӨ әртүрлі салаларда, соның ішінде металл өңдеуде, электроникада, медициналық жабдықтарда және тамақ өңдеуде кеңінен қолданылады. Әдістің артықшылығына жоғары тиімділік, күрделі пішіндер мен материалдарды өңдеу мүмкіндігі, сондай-ақ химиялық агрессивті заттарды қолданудың болмауына байланысты экологиялық қауіпсіздік жатады. Плазманы электродиттік өңдеу кең ауқымды әлеуетті қолданбалы материалдардың беттік модификациясы саласындағы перспективті бағыт болып табылады. Жұмыста электродиттік плазмалық өңдеу кезінде катодты қыздыру режимінде құрылымдық болаттардың жер бетіне жақын аймағында бу-газ қабықшасының пайда болуының теориялық зерттеулері қарастырылды. Тозуға, температураға және күшке жиі ұшырайтын бұйымдардың қажетті механикалық қасиеттерін қамтамасыз ететін электродиттік-плазмалық шынықтыру технологиясы зерттелді. Теориялық зерттеулердің нәтижелері бойынша катодты қыздыру кезінде бу-газ қабықшасының түзілу моделін алу үшін кернеу мен ток тығыздығының математикалық есептеулері жүргізіліп, тәуелділік графиктері тұрғызылды. Катодты қыздыру кезінде бу-газ қабықшасының пайда болуының есептеулерін модельдеу Maple бағдарламасы арқылы жүзеге асырылды.

Кілт сөздер: электродит-плазмалық өңдеу, бу-газ қабығы, модельдеу, электродит, глицерин, Maple.

С.Ш. ХАЛИК¹, Ш.Р. КУРБАНБЕКОВ²

¹ТОО «Институт иновационных технологий и новых материалов» (Казахстан, г. Туркестан),
e-mail: halyksaida@gmail.com

²PhD, ассоциированного профессора Международного казахско-турецкого университета
имени Ходжи Ахмеда Ясави (Казахстан, г. Туркестан), e-mail: sherzod.Kurbanbekov@ayu.edu.kz

Моделирование вольт-амперных характеристик парогазовой оболочки в процессе электродитно-плазменной обработки

Аннотация. Электродитно-плазменная обработка (ЭПО) – это метод поверхностной обработки материалов, основанный на использовании плазмы и электродитического раствора. В данной работе рассматривается принцип действия, основные применения и потенциальные преимущества ЭПО. Методика ЭПО включает в себя погружение

обрабатываемого объекта в электролитический раствор, после чего подается электрический ток, вызывающий разложение раствора и образование плазменного облака у поверхности обрабатываемого материала. Воздействие плазмы и химически активных компонентов раствора позволяет модифицировать поверхность материала, улучшая его свойства, такие как адгезия, прочность и коррозионная стойкость. ЭПО широко применяется в различных отраслях, включая металлообработку, электронику, медицинское оборудование и пищевую промышленность. Преимущества метода включают высокую эффективность, возможность обработки сложных форм и материалов, а также экологическую безопасность за счет отсутствия использования химически агрессивных веществ. Электролитно-плазменная обработка представляет собой перспективное направление в области поверхностной модификации материалов с широким спектром потенциальных применений.

В работе были рассмотрены теоритические исследования формирования парогазовой оболочки в приповерхностной области конструкционных сталей в режиме катодного нагрева при электролитно-плазменной обработке. Была исследована технология электролитно-плазменного упрочнения, обеспечивающая требуемые механические свойства изделий, которые часто подвергаются износу, температурным и силовым воздействиям. По результатам теоритических исследований, для получения модели образования парогазовой оболочки в процессе катодного нагрева были сделаны математические расчеты напряжения, плотности тока, а также построены графики зависимости. Моделирование расчетов образования парогазовой оболочки в процессе катодного нагрева проводилось при помощи программы Maple.

Ключевые слова: электролитно-плазменная обработка, парогазовая оболочка, моделирование, электролит, глицерин, Maple.

S.SH. KHALIK¹, SH.R. KURBANBEKOV²

¹LLP "Institute of Innovative Technologies and New Materials" (Kazakhstan, Turkistan), e-mail: halyksaida@gmail.com

²PhD, Assistant Professor Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Kazakhstan, Turkistan), e-mail: sherzod.Kurbanbekov@ayu.edu.kz

Simulation of voltage characteristics of vapor-gas shell during electrolyte-plasma treatment

Abstract. Electrolytic plasma processing (EPT) is a method of surface treatment of materials based on the use of plasma and an electrolytic solution. This abstract discusses the principle of action, main applications and potential benefits of EPT. The EPT technique involves immersing the object being treated in an electrolytic solution, after which an electric current is applied, causing decomposition of the solution and the formation of a plasma cloud at the surface of the material being processed. Exposure to plasma and chemically active components of the solution makes it possible to modify the surface of the material, improving its properties, such as adhesion, strength and corrosion resistance. EPT is widely used in a variety of industries, including metalworking, electronics, medical equipment and food processing. The advantages of the method include high efficiency, the ability to process complex shapes and materials, as well as environmental safety due to the absence of the use of chemically aggressive substances. Electrolytic plasma processing is a promising direction in the field of surface modification of materials with a wide range of potential applications. In this paper, theoretical studies of vapor-gas shell formation in the near-surface region of structural steels in the cathodic heating mode of electrolyte-plasma treatment were considered. The technology of electrolyte-plasma hardening, providing the required mechanical properties of products, which are often subjected to wear, temperature and force effects, was

investigated. Based on the results of theoretical studies, mathematical calculations of voltage, current density, and dependence graphs were made to obtain a model of vapor-gas shell formation in the process of cathodic heating. Modeling of calculations of vapor-gas shell formation in the process of cathodic heating was carried out with the help of Maple program.

Keywords: electrolyte-plasma treatment, vapor-gas shell, modeling, electrolyte, glycerol, Maple.

Кіріспе

Электролиттік плазмалық өңдеу (ЭПӨ) – материалдардың беттерін өзгерту үшін сұйықтықтардағы электр разрядын қолдануға негізделген инновациялық технология. Бұл әдіс электрохимиялық және плазмалық өңдеудің артықшылықтарын біріктіріп, өнеркәсіп пен ғылымның әртүрлі салаларында кең ауқымды қолдануды қамтамасыз етеді. Технологияның ұдайы дамуы және материалдардың сапасы мен функционалдығын арттыру қажеттілігінің артуы аясында плазманы электролиттік өңдеу зерттеушілер мен инженерлердің қызығушылығын арттыратын нысанға айналууда.

Электролиттік плазмалық өңдеу (ЭПӨ) тозуға төзімділік пен микроқаттылықтың жоғарылауын қамтамасыз ететін бөлшектің бетінде модификацияланған қабат алуға мүмкіндік береді, сонымен қатар барлық фазалық түзілістердің жұқа беттік қабатта біркелкі таралуына мүмкіндік береді, осылайша өнімнің өнімділік сипаттамаларын жақсартады[1]. Тұрақты дамудың ең маңызды факторы энергия тұтынуды азайтатын және жоғары экологиялық және экономикалық көрсеткіштерге ие жаңа технологиялық процестерді кеңінен енгізу болып табылады. Мұндай процестерге металдар мен қорытпаларды электролиттік плазмада жылтырату жатады, бұл дәстүрлі әдістерге балама: механикалық және электрохимиялық жылтырату[2].

Дәстүрлі химиялық немесе электрохимиялық жылтыратудан айырмашылығы, электролиттік-плазмалық технологияда улы қышқылдық компоненттерден әлдеқайда арзан төмен концентрациялы тұздардың (2–10%) экологиялық таза сулы ерітінділері қолданылады [3].

Сонымен қатар, электролиттік плазманы өңдеу әртүрлі материалдарды, соның ішінде металдарды, полимерлер мен керамикаларды функционалдық етудің тиімді әдісі болып табылады, оның медициналық құрылғылар мен электроникадан бастап авиация және автомобиль өнеркәсібіне дейінгі салаларда қолданылуын кеңейтеді. Бұл тұрғыда ЭПӨ-ның негізгі технологиялық аспектілерін де, оны өнеркәсіптік өндіріске енгізуде кездесетін ықтимал қиындықтарды да ескеру маңызды.

Электролит-плазмалық өңдеу сонымен қатар өзінің әлеуетті экологиялық тұрақтылық пайдасы үшін ғылыми қоғамдастықтың назарын аударуда. Химиялық тұндыру және электрохимиялық жылтырату сияқты дәстүрлі өңдеу әдістерімен салыстырғанда, ЭПӨ тиімдірек және аз ластаушы баламаларды ұсына алады. Бұл әсіресе тұрақты өндіріске және қоршаған ортаға теріс әсерді азайтуға сұраныстың артуы жағдайында маңызды болып отыр[4].

Электролиттік - плазмалық өңдеудің (ЭПӨ) негізгі параметрлері мыналарды қамтиды:

Электролит түрі: Электролит ЭПӨ процесінде негізгі жұмысшы зат болып табылады. Ол белгілі бір процеске қойылатын талаптарға және өңделетін материалдың мақсатты қасиеттеріне байланысты таңдалуы мүмкін.

Электрод түрі: Электродтар разрядты жасауда және энергияны электролитке беруде маңызды рөл атқарады. Олар әртүрлі материалдардан жасалуы мүмкін және нақты қолданбаға байланысты әртүрлі пішінге ие болады.

Электрлік параметрлер: Электр тогы, кернеу және жиілік ЕРО процесін басқару үшін маңызды. Олар разрядтың қарқындылығына, энергия мен жылуының таралуына, сондай-ақ

өңделген беттің сипаттамаларына әсер етеді.

Температура: Температура электролитте және өңделген материалдың бетінде болатын химиялық және физикалық процестерді анықтауда рөл атқарады. Температураны бақылау қызып кетудің алдын алу және өңделген беттің қажетті қасиеттерін қамтамасыз ету үшін маңызды[1, 2].

Өңдеу уақыты: Материалдың электролиттегі разрядқа ұшырау уақыты өңдеу дәрежесін және оның қасиеттерінің өзгеруін анықтайды.

Химиялық қоспалар: электролитке арнайы химиялық заттарды қосу процесс пен өңделетін материалдың қасиеттерін өзгертуі мүмкін. Бұл адгезияны, коррозиядан қорғауды және т.б. жақсартуға арналған қоспаларды қамтиды.

Ток тығыздығы: Бұл материалдың бетінің бірлік ауданынан өтетін электр тогының мөлшерін анықтайтын параметр. Ток тығыздығын бақылау бетті біркелкі өңдеуді қамтамасыз ету және қызып кетуді немесе аз өңдеуді болдырмау үшін маңызды.

Электрод қашықтығы: бұл электролиттегі анод пен катод арасындағы разряд өтетін қашықтық. Оңтайлы қашықтық нақты өңдеу шарттарына және бет сапасына қойылатын талаптарға байланысты өзгереді.

Электролиттің құрамы мен концентрациясы: Электролитте процестің сипаттамаларына және өңделетін материалдың қасиеттеріне әсер ететін әртүрлі қоспалар мен қоспалар болуы мүмкін. Қажетті нәтижеге қол жеткізуде электролиттің құрамы мен концентрациясын бақылау басты рөл атқарады[5].

Қысым және атмосфера: Кейбір ЭПӨ процестері электролитте болатын разряд сипаттамаларына және химиялық реакцияларға әсер етуі мүмкін белгілі бір қысым немесе атмосфера астында жүзеге асырылады.

Электролитті-плазмалық өңдеуде негізгі сипаттама вольт-амперлік сипаттама болып табылады. Вольт-амперлік сипаттама (V-I сипаттамасы), электролиттік плазманы өңдеу жағдайында, электр тогының (I) электродтарға немесе өңдеу процесіне қатысатын жүйеге берілетін кернеуге (V) тәуелділігін сипаттайды. Бұл сипаттама ЭПӨ процесін басқаруда және оңтайландыруда шешуші рөл атқарады.

Ток кернеуінің сипаттамасы көптеген факторларға, соның ішінде қолданылатын электролит түріне, өңделетін материалдың бетінің күйіне, электродтар арасындағы қашықтыққа және басқа технологиялық параметрлерге байланысты өзгереді.

Ол әдетте әртүрлі жұмыс аймақтарын, газды шығару аймағын және басқаларды қамтуы мүмкін қисық сызықты білдіреді.

Омдық аймақ токтың кернеуге сызықтық тәуелділігімен сипатталады, бұл электролит кедергісінің басымдылығын көрсетеді. Газ разрядының аймағында электролиттің иондануының пайда болуымен және плазманың пайда болуымен байланысты кернеудің жоғарылауымен токтың күрт өсуі орын алады.

Ток кернеуінің сипаттамасы өңдеу процесін бақылау үшін ғана емес, сонымен қатар өңделген беттің жағдайын диагностикалау және қажетті сипаттамаларға қол жеткізу үшін оңтайлы жағдайларды анықтау үшін де маңызды. Мысалы, V-I қисығының пішінінің өзгеруі біркелкі емес өңдеу немесе бет ақаулары сияқты ықтимал проблемаларды көрсетеді[6].

Ток кернеуін талдау сонымен қатар энергияны тұтынуды және процестің тиімділігін оңтайландыруға, шығындарды азайтуға және өнімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Бұл электролиттік плазманы өңдеу сапасы мен өнімділігі жоғары талаптары бар өнімдерді жаппай өндіру үшін қолданылуы мүмкін өнеркәсіптік қолданбаларда әсіресе маңызды.

Сонымен қатар, ток кернеуінің сипаттамасын пайдалану шегін анықтау және ЭПӨ процесі кезінде жабдықтың шамадан тыс жүктелуін немесе зақымдануын болдырмау үшін пайдалануға болады. Бұл бүкіл өңдеу процесінде жүйенің тұрақты және қауіпсіз жұмысын қамтамасыз етуге көмектеседі[1].

Осы инновациялық процесті дамыту мен оңтайландыруда электролиттік плазманы

өңдеуді модельдеу маңызды рөл атқарады. Ол жүйенің әрекетін болжауға, өңдеу нәтижелеріне әртүрлі параметрлердің әсерін бағалауға және эксперименттік зерттеулерге байланысты уақыт пен шығындарды азайтуға мүмкіндік береді.

Жетілдірілген математикалық және компьютерлік модельдер өңдеу процесіне әсер ететін көптеген факторларды, мысалы, электрлік және химиялық параметрлерді, гидродинамикалық жағдайларды, жылу беруді және басқаларды есепке алуға мүмкіндік береді. Бұл зерттеушілер мен инженерлерге жүйеде болып жатқан физикалық және химиялық процестерді жақсы түсінуге және оның жұмысын оңтайландыруға көмектеседі.

Дегенмен, барлық артықшылықтарға қарамастан, модельдеу нәтижелердің сенімділігін қамтамасыз ету үшін дәл калибрлеуді және эксперименттік деректермен тексеруді қажет етеді. Сонымен қатар, ғылым мен техникадағы жаңа жаңалықтарды есепке алу үшін үлгілер мен әдістерді үздіксіз жетілдіру қажет.

Осылайша, модельдеу электролиттік плазманы өңдеу процестерін дамыту мен оңтайландыруда, ресурстарды тиімді пайдалануды қамтамасыз етуде, өнім сапасын жақсартуда және жаңа технологияларды әзірлеу уақытын қысқартуда маңызды рөл атқарады.

Зерттеу әдістері

Бұл әдіс металл-электролит интерфейсындағы жоғары тығыздықтағы электр тогының (бір шаршы сантиметрге бірнеше ампер) ағынының ерекшеліктеріне негізделген. Ток пен кернеу тығыздықтарының белгілі бір критикалық мәндерінен асқаннан кейін металл анодтың айналасында стационарлық бу-газ қабығы пайда болады және анодтық процестің электрогидродинамикалық режимі орнатылады. Анодтың жанында көп фазалы металл-плазма-газ-электролит жүйесі пайда болады, онда тек иондар ғана емес, сонымен қатар электрондар да заряд тасымалдаушы қызметін атқарады. Бөлшектің бетіне химиялық белсенді орта мен электр разрядтарының біріккен әсері жылтырату өнімдерінің әсеріне әкеледі [4].

Кез келген металды электролиттік плазмада өңдеу материалды және еңбек ресурстарын үнемдеуге және металл өңдеудегі еңбек өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Технологиялық процесс санитарлық нормаларға сәйкес келеді және жұмысшылардың еңбек жағдайын айтарлықтай жақсарту және қызмет көрсететін персоналдың қауіпсіз жұмысын қамтамасыз ету бойынша маңызды әлеуметтік мәселені шешуге мүмкіндік береді [5].

Бұл әдіс өнімді үш негізгі бағыт бойынша өңдеуге мүмкіндік береді:

- күрделі бөлшектердің күрделі профильді беттерін жылтырату;
- саңылауларды тазалау және өткір бұрыштарды дөңгелектеу;
- металл бұйымдарды сәндік жылтырату.

Алдын ала талдау көрсеткендей, электролит-плазмалық процестің толық сипаттамасы таза физикалық немесе таза химиялық түсініктерге негізделуі мүмкін емес. Бұл өзара байланысты физикалық және химиялық процестер, сондықтан оларды физикалық және химиялық деп тек шартты түрде бөлуге болады. Тұрақты плазма өндірісіне оң және теріс электродтардың әртүрлі аймақтарымен қол жеткізіледі [6].

Бұл салаға қызығушылық бөлшектердің ең маңызды өнімділік қасиеттері (берімділік, беріктік, коррозияға төзімділік және т.б.) басқа нәрселермен қатар, бетінің жеке сапа сипаттамаларына байланысты болатындығына байланысты. Бұйымның бетін жылтырату оның механикалық қасиеттерін жақсартатыны, жанасатын беттер арасындағы үйкеліс коэффициентін төмендететіні, металдардың пластикалық деформацияға ұшырау қабілетін арттыратыны белгілі [7-10]. Бетінің кедір-бұдырының класын арттырудың әртүрлі технологиялары бар: механикалық жылтырату, химиялық және электрохимиялық жылтырату. Электрлік қаптауда қолданылатын химиялық және электрохимиялық жылтырату әдістері кейбір жағдайларда механикалық жылтыратуды ауыстыруға мүмкіндік береді, бұл

өте көп еңбекті қажет етеді. Авиация өнеркәсібінің кәсіпорындарында дайын өнімнің әрлеу бетін өңдеу негізінен механикалық жылтырату арқылы жүзеге асырылады. Механикалық бетті өңдеудің кемшілігі күрделі профильді бұйымдарды өңдеудің мүмкін еместігі, еңбек сыйымдылығы, беткі қабаттың кернеулі-деформациялық күйінің және құрылымдық-фазалық күйінің өзгеруі, бұл кейбір жағдайларда бетінің күйін қалпына келтіру үшін қосымша операцияларды қажет етеді. [11, 12]. Механикалық өңдеу әдістерінен айырмашылығы, химиялық және электрохимиялық жылтырату беттің кедір-бұдырын өзгертуге ғана емес, сонымен қатар металдың ақаулы беткі қабатын күш қолданбай жоюға мүмкіндік береді [13]. Дегенмен, металдарды химиялық және электрохимиялық жылтыратуға арналған барлық дерлік ерітінділерде активатор ретінде күшті қышқылдар бар (фтор қышқылы, күкірт қышқылы, ортофосфор қышқылы және т.б.), олар беттің пассивациясын болдырмайды және электродтық потенциалды теріс мәндерге ауыстырады, ал азот қышқылы, сутегі асқын тотығы немесе хром ангидрид тотықтырғыштар ретінде пайдаланылады. Мұндай шешімдер өте агрессивті, улы және қоршаған ортаға үлкен қауіп төндіреді және арнайы жоюды қажет етеді. [14-17].

Күшті эксперименттік зерттеулермен қатар, ЭПӨ технологиясын жетілдіру технологиялық процеске дәл сәйкес келетін математикалық модельдерді құрумен байланысты. Ғылым мен техниканың барлық салаларында есептеу әдістерін кеңінен қолдану және физиканы, материалтануды және информатиканы, сондай-ақ химия мен техномеханиканы біріктіретін жаңа ғылыми бағыт «есептеу материалтану» пайда болуымен, физикалық процестерді модельдеу материалдардың құрылымы және олардың ішкі және сыртқы әсерлерден өзгеруі мүмкін болды [18-20].

Бұл жұмыстың мақсаты электролиттік плазмалық өңдеу (ЭПӨ) кезінде катодты қыздыру режимінде құрылымдық болаттардың жер бетіне жақын аймағында бу-газ қабықшасының (БГҚ) түзілуін зерттеу және теориялық қалыңдығын және бу-газ қабықшасының вольт-амперлік сипаттамаларын анықтау болып табылады.

Талдау мен нәтижелер

Ең алдымен:

$$\varphi(r) = U \frac{\ln(R_k / r)}{\ln(R_k / R_A)} \quad (1)$$

Бұл жерде r — радиальды координата. Сонда Ом заңы бойынша ерітіндідегі токтың тығыздығы келесі өрнек арқылы анықталады

$$j = \chi \frac{d\varphi}{dr} = \frac{\chi U}{r \ln(R_K / R_A)} \quad (2)$$

Кесте-1. 2-формула бойынша алынған мәндер кестесі

R_K , мм	R_A , мм	$\chi, 10^{-5}$	r	U , В
20	16	6.4	1	180..280

мұндағы r — ерітіндінің меншікті электр өткізгіштігі.

Биіктігі h , радиусы r және ауданы S цилиндрлік бет арқылы өтетін ток мынаған тең:

$$I = jS = j2\pi rh = \frac{2\pi h\chi U}{\ln(R_K / R_A)} \quad (3)$$

$\ln(1 + \delta / R_A) \approx \delta / R_A$, үзілістің пайда болу уақытын табуға мүмкіндік береді:

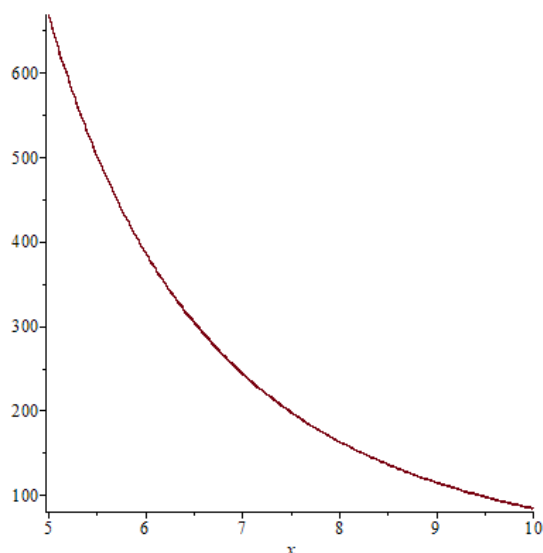
$$\Delta t = \frac{\rho R_A^2 (c\Delta T + \psi) \ln^2(R_K / R_A)}{\chi U^2} \quad (4)$$

Бұдан шығатыны, төмен кернеулерде формула (4) дұрыс емес болады, өйткені қыздыру неғұрлым ұзақ болса, жылуды кетіруді ескермеу соғұрлым дұрыс емес. Сонда $U = f \cdot \Delta t$, мұндағы f — кернеудің тұрақты өсу жылдамдығы, онда

$$\Delta t = \sqrt[3]{\frac{\rho R_A^2 (C\Delta T + \psi) \ln^2(R_K / R_A)}{f^2 \chi}} \quad (5)$$

Кесте-2. 5-формула бойынша алынған мәндер кестесі

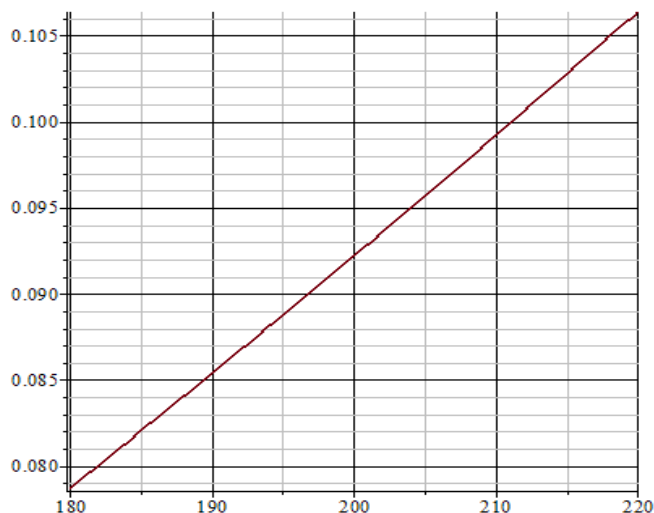
R_K	R_A	ρ	C	ψ	χ	ΔT	U
20	16	1260	3460	825	$6.4 \cdot 10^6$	220	180..280



Сурет-1. Қайнау уақытының графигі

Богуславский-Лангмюр теңдеуінің көмегімен ток-кернеу сипаттамасын есептейік

$$U = \frac{2\omega \varepsilon_0 E_0^{5/2}}{5j} \left[\left(1 + \frac{3j\delta}{2\omega \varepsilon_0 E_0^{3/2}} \right)^{5/3} - 1 \right] \quad (6)$$



Сурет-2. 5-ші формула бойынша есептелген тұрақты қалыңдықтағы бу-газ қабықшасының вольт-амперлік сипаттамасының моделі

Есептелген тәуелділіктер тәжірибелік деректерге өте жақын.

Қорытынды

Қорытындылай келе, теориялық зерттеулердің нәтижелеріне сүйене отырып, катодты қыздыру процесі кезінде бу-газ қабықшасының түзілу моделін алу үшін кернеу мен ток тығыздығының математикалық есептеулері жүргізіліп, тәуелділік графиктері тұрғызылды. Maple сияқты компьютерлік бағдарламаларды қолдану нәтижесінде бу-газ қабықшасының қалыңдығының температураға, үлгінің сызықтық өлшемдеріне және үлгіні электролитке батыру кезінде тереңдікке тәуелділігін қоса алғанда, бірқатар тәуелділіктерді зерттеуге мүмкіндік туды. Электролиттік плазмамен қыздыру кезінде бу-газ қабықшасының пайда болуын математикалық зерттеулер бу-газ қабықшасының қалыңдығын, және қыздыру температурасын дұрыс бағалауға және бу-газ қабықшасының қалыңдығының үлгі өлшеміне тәуелділігін анықтауға мүмкіндік берді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Белкин П. Мир материалов и технологий // Техносфера. – 2011. – Vol. – 464. – P. 107.
2. Лазарев Д. Е. Математическое моделирование процессов в источнике питания для электролитно-плазменной обработки // Вестник УГАТУ. – 2008. – P. 131.
3. Алексеев Ю. Г. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий // Наука и техника. – 2016. – P. 61.
4. Попов А.И. Анализ тепловых явлений при струйной фокусированной электролитно-плазменной обработке // Научно-технические ведомости СГУ. – 2016. – P. 141.

5. Володин А. Ю., Заруба Д. С., Величко Н. В. Способ электролитно-плазменной обработки внутренних пространственно-сложных поверхностей различной кривизны корпусных деталей центробежных насосов ЖРД // Решетневские чтения: материалы XX Междунар. науч. конф. / СибГАУ. Красноярск, 2016.
6. V.F. Besyasiychniy, B.M. Drapkin, M.A. Prokofiyev, M.V. Timofeev. Physics and chemistry of material treatment. 6, 121—125 (2003).
7. A.D. Pogrebnyak, O.P. Kulmentiyeva and other. The Letters of Technical Physics Journal. 29 (8), 8—15 (2003).
8. E.N. Kablov The aviation materials and technologies. 2, 7—17 (2012).
9. Aliakseyeu, Yu. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces / Yu. Aliakseyeu, A. Korolyov, A. Bezyazychnaya // CO-MAT-TECH–2006: Proceeding of the Abstracts 14 International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19–20 oct. 2006. Slovakia, Trnava. P. 6.
10. Plasma Electrolytic Polishing – an Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range / K. Nestler [et al.] // Proceedings of the 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII), 8–22 Apr. 2016, Tokyo, Japan, Procedia CIRP 42 (2016). P. 503–507.
11. Vacuum Deposited Polymer and DLC Multilayer Coatings on Austenitic Steel, Structure and Tribotechnical Properties in Physiological Solution / V. P. Kazachenko [et al.] // International Conference on Industrial Tribology. India: Bangalore, 2006. P. 55.
12. Особенности процессов размерной обработки металлических изделий электролитно-плазменным методом / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Литье и металлургия. 2005. № 4. С. 188–195.
13. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2012. № 3. С. 3–6.
14. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю. Г. Алексеев [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. Минск: БНТУ, 2015. 203 с. ISBN 978-985-550-702-5.
15. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 1. С. 61–68. DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68.
16. Smirnov A.A., Kusmanov S.A., Kusmanova, I.A., Belkin P.N. Effect of electrolyte depletion on the characteristics of the anodic plasma electrolytic nitriding of a VT22 titanium alloy // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. –2017.–53.–413–418
17. Sherzod Kurbanbekov, Mazhyn Skakov, Michail Scheffler, Azret Naltaev. Changes of Mechanical Properties of Steel 12Cr18Ni10Ti After Electrolytic-Plasma Cementation. –2013. –No601. –P. 59–63.
18. Lou B.S., Lee J.W., Tseng C.M., Lin Y.Y., Yen C.A. Mechanical property and corrosion resistance evaluation of AZ31 magnesium alloys by plasma electrolytic oxidation treatment: Effect of MoS₂ particle addition. // Surface and Coatings Technology. –2018. –No350. –813–822.
19. Суминов И.В., Белкин П. Н., Эпельфельд А.В., Людин В. Б. и др. Плазменно электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. –М.:Техносфера. –2011.–No2. –С. 512.
20. Погребняк А.Д., Тюрин Ю. Н., Бойко А. Г., Жадкевич М.Л., Кальшканов М.К., Рuzимов Ш.М. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы // Успехи физики металлов. –2005.–Т. 6.–No4.–С. 273–344.

REFERENCES

1. Белкин П. Мир материалов и технологий // Техносфера. – 2011. – Vol. – 464. – P. 107.
2. Лазарев Д. Е. Математическое моделирование процессов в источнике питания для электролитно-плазменной обработки // Вестник УГАТУ. – 2008. – P. 131.
3. Алексеев Ю. Г. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий // Наука и техника. – 2016. – P. 61.

4. Попов А.И. Анализ тепловых явлений при струйной фокусированной электролитно-плазменной обработке// Научно-технические ведомости СГУ. – 2016. – Р. 141.
5. Володин А. Ю., Заруба Д. С., Величко Н. В. Способ электролитно-плазменной обработки внутренних пространственно-сложных поверхностей различной кривизны корпусных деталей центробежных насосов ЖРД // Решетневские чтения: материалы XX Междунар. науч. конф. / СибГАУ. Красноярск, 2016.
6. V.F. Besyasychniy, B.M. Drapkin, M.A. Prokofiyev, M.V. Timofeev. Physics and chemistry of material treatment. 6, 121—125 (2003).
7. A.D. Pogrebnyak, O.P. Kulmentiyeva and other. The Letters of Technical Physics Journal. 29 (8), 8—15 (2003).
8. E.N. Kablov The aviation materials and technologies. 2, 7—17 (2012).
9. Aliakseyeu, Yu. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces / Yu. Aliakseyeu, A. Korolyov, A. Bezyazychnaya // CO-MAT-TECH–2006: Proceeding of the Abstracts 14 International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19–20 oct. 2006. Slovakia, Trnava. P. 6.
10. Plasma Electrolytic Polishing – an Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range / K. Nestler [et al.] // Proceedings of the 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII), 8–22 Apr. 2016, Tokyo, Japan, Procedia CIRP 42 (2016). P. 503–507.
11. Vacuum Deposited Polymer and DLC Multilayer Coatings on Austenitic Steel, Structure and Tribotechnical Properties in Physiological Solution / V. P. Kazachenko [et al.] // International Conference on Industrial Tribology. India: Bangalore, 2006. P. 55.
12. Особенности процессов размерной обработки металлических изделий электролитно-плазменным методом / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Литье и металлургия. 2005. № 4. С. 188–195.
13. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2012. № 3. С. 3–6.
14. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю. Г. Алексеев [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. Минск: БНТУ, 2015. 203 с. ISBN 978-985-550-702-5.
15. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 1. С. 61–68. DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68.
16. Smirnov A.A., Kusmanov S.A., Kusmanova, I.A., Belkin P.N. Effect of electrolyte depletion on the characteristics of the anodic plasma electrolytic nitriding of a VT22 titanium alloy// Surface Engineering and Applied Electrochemistry. –2017.–53.–413–418
17. Sherzod Kurbanbekov, Mazhyn Skakov, Michail Scheffler, Azret Naltaev. Changes of Mechanical Properties of Steel 12Cr18Ni10Ti After Electrolytic-Plasma Cementation. –2013. –No601. –P. 59–63.
18. Lou B.S., Lee J.W., Tseng C.M., Lin Y.Y., Yen C.A. Mechanical property and corrosion resistance evaluation of AZ31 magnesium alloys by plasma electrolytic oxidation treatment: Effect of MoS2 particle addition. // Surface and Coatings Technology. –2018. –No350. –813–822.
19. Суминов И.В., Белкин П. Н., Эпельфельд А.В., Людин В. Б. и др. Плазменно электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. –М.:Техносфера. –2011.–No2. –С. 512.
20. Погребняк А.Д., Тюрин Ю. Н., Бойко А. Г., Жадкевич М.Л., Калышканов М.К., Рузимов Ш.М. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы // Успехи физики металлов. –2005.–Т. 6.–No4.–С. 273–344.