



ТЕХНИКАЛЫҚ ФИЗИКА
ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА
TECHNICAL PHYSICS

DOI 10.51885/1561-4212_2022_2_90
MFTAA 44.29.01

Д.К. Ескермесов¹, А.С. Шоенбаева²

Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

¹E-mail: didar.eskermesov@mail.ru*

²E-mail: akerkesha_29.05.98@mail.ru

АНОДТЫ МИКРОДОҒАЛЫҚ ОКСИДТЕУ ӘДІСІНІҢ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ КРИТЕРИЙЛЕРІ РЕТІНДЕ ПРОЦЕСТІҢ НЕГІЗГІ ПАРАМЕТРЛЕРІ ЖӘНЕ ЖАБЫНДАРДЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫ

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ КАК КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА АНОДНОГО МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

THE MAIN PROCESS PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF COATINGS AS CRITERIA FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF THE METHOD OF ANODIC MICROARC OXIDATION

Аңдатпа. Мақала ұшқынның шарттары мен параметрлерін өзгерту арқылы микродоғалық оксидтеу процесін жаңғыртудың орындылығы мен тиімділігін бағалауға, сондай-ақ қалыптастырылатын керамика тәрізді жабындардың сапасын бағалау және қызметтік қасиеттерін болжау критерийлерін таңдауға арналған. Құрылымның қалыптасу сипатын өзгертуде және тотықтырылған қорытпаның болжамды сапасы мен қасиеттерін қамтамасыз етуде электролитке батырылған объектінің өңделген беті бойымен қозғалатын электр разрядтары процесінде пайда болатын ұшқынның қарқындылығы басым рөл атқарады. Ұшқынның қарқындылығы эквивалентті жабындарды алу шарттарын анықтайды: оксидтелген бөліктің айналасындағы ұшқынның табиғаты неғұрлым аз болса, соғұрлым қалыптасқан жабынның қалыңдығы біркелкі және тез өседі және оның тығыздығы жоғарырақ болады. Бұл пікірлер тек анодты ток компонентінің болуымен сипатталатын анодты МДО (АМДО) әдісін модернизациялау нұсқасын ұсынуға мүмкіндік берді, осылайша электролиз ваннасында квазикатодтар жүйесін қолдану арқылы ұшқын процесін тұрақтандыру арқылы тармақталған кеуектілігі бар жұқа жабындарды алуға мүмкіндік берді. Осы зерттеуде АМДО әдісімен оның стандартты және жаңғыртылған нұсқаларында алынған жабындардың параметрлерін нақты уақыт режимінде ұшқынның разрядтарын бөлу сипатын бекіту арқылы бақылау мүмкіндіктері қарастырылады, мұның жанама дәлелі уақыт бойынша ток тығыздығының өзгеруі және жасалған жабындардың қалыңдығының біркелкілігі болып табылады. Микродоғалық оксидтеу сипатының қалыптасқан қабаттардың құрылымдық және сапалық сипаттамаларына әсерін ескере отырып, жетілдірілген әдіспен алынған жабын беті жоғары сапалы болуы керек, көрсеткіштердің бірі тегіс және біркелкі рельеф болып табылады. Осылайша, жетілдірілген процестің тиімділігінің тағы бір критерийі кедір-бұдырдың амплитудалық және қадамдық параметрлері болуы мүмкін, олар қалыптасқан жабынның микропрофилін объективті бағалауға мүмкіндік бермей, оның қалыңдығының өсу сипаты мен сапаның өзгеруі туралы неғұрлым кең ақпарат бере алады, нәтижесінде осындай жабыны бар металл заттардың пайдалану деңгейінің деңгейін анықтайды.

Түйін сөздер: алюминий, микродоғалық оксидтеу, рельеф, ток тығыздығы, квазикатод, ұшқын, кедір-бұдыр.

Аннотация. Статья посвящена оценке рациональности и результативности усовершенствования процесса микродугового оксидирования путем видоизменения условий и параметров искры, а еще выбору критериев оценки качества и прогнозирования функциональных свойств формируемых керамических покрытий. В изменении характера образования структуры и обеспечении полагаемого качества и свойств окисленного сплава преобладающую роль играет интенсивность искр, возникающих в процессе электрических разрядов, движущихся по обрабатываемой поверхности объекта, погруженного в электролит. Интенсивность искр определяет обстоятельства обретения равнозначных покрытий: чем меньше характер искр вокруг оксидированной части, тем равномернее и стремительней растет толщина формирующегося покрытия и тем выше его плотность. Эти соображения разрешили предложить вариант усовершенствования анодного способа МДО (АМДО), характеризующегося наличием только анодного компонента тока, тем самым дозволит получать тонкие покрытия с разветвленной пористостью путем стабилизации процесса искрообразования с применением системы квазикаатодов в электролизной ванне. В реальном изучении рассматриваются возможности контроля параметров покрытий, полученных способом АМДО в его стандартном и модернизированном вариантах, путем закрепления характера разделения искровых разрядов в режиме реального времени, косвенным доказательством чего является видоизменение плотности тока во времени и равномерность толщины создаваемых покрытий. С учетом воздействия характера микроудобного оксидирования на структурные и добротные свойства сформированных слоев, поверхность покрытия, полученная улучшенным способом, обязана быть добротной, одним из показателей является ровный и равномерный рельеф. Таким образом, еще одним критерием производительности улучшенного процесса могут быть амплитудно-ступенчатые параметры шероховатости, которые, не разрешая непредвзято оценить микропрофиль формируемого покрытия, могут дать больше широкую информацию о нраве роста его толщины и изменении качества, что в финальном последствии определяет уровень применения металлических предметов с таким покрытием.

Ключевые слова: алюминий, микродуговое оксидирование, рельеф, плотность тока, квазикаатод, искра, шероховатость.

Abstract. The article is devoted to the evaluation of the rationality and effectiveness of improving the microarc oxidation process by modifying the spark conditions and parameters, as well as the selection of criteria for assessing the quality and predicting the functional properties of the formed ceramic coatings. In changing the nature of the formation of the structure and ensuring the expected quality and properties of the oxidized alloy, the intensity of sparks arising during electrical discharges moving along the treated surface of an object immersed in an electrolyte plays a predominant role. The intensity of the sparks determines the circumstances of obtaining equivalent coatings: the smaller the nature of the sparks around the oxidized part, the more evenly and rapidly the thickness of the formed coating grows and the higher its density. These considerations allowed us to propose an option for improving the MDA (AMAO) anode method, characterized by the presence of only the anode component of the current, thereby allowing thin coatings with branched porosity to be obtained by stabilizing the sparking process using a system of quasi-cathodes in an electrolysis bath. In a real study, the possibilities of controlling the parameters of coatings obtained by the AMAO method in its standard and upgraded versions are considered by fixing the nature of the separation of spark discharges in real time, indirect proof of which is the modification of the current density over time and the uniformity of the thickness of the coatings created. Taking into account the impact of the nature of micro-oxidation on the structural and sound properties of the formed layers, the coating surface obtained by an improved method must be sound, one of the indicators is a smooth and uniform relief. Thus, another criterion for the performance of the improved process can be amplitude-step roughness parameters, which, without allowing an unbiased assessment of the microprofile of the coating being formed, can give more broad information about the nature of its thickness growth and quality changes, which in the final consequence determines the level of use of metal objects with such a coating.

Keywords: aluminum, microarc oxidation, relief, current density, quasi-cathode, spark, roughness.

Кіріспе. Микродоғалық оксидтеу пайдалану кезінде тозуға, коррозияға және жылуға төзімділікті, электр окшаулау және сәндік ерекшеліктерді біріктіретін ерекше қасиеттер кешені бар көп функциялы керамика тәрізді жабындарды алуға мүмкіндік береді. Бұл

әдістің бүкіл әлемде авиация, зымыран, кеме, машина және аспап жасау, медицина, тоқыма және металл бұйымдары және т.б. сияқты негізгі салаларда қажеттілігін анықтайды.

Микродоғалық оксидтеу процесінің қарапайым анодтаудан және өңдеудің басқа әдістерінен басты айырмашылығы – электролитке батырылған объектінің өңделетін бетіне өтетін электр разрядтарының энергиясын пайдалану, нәтижесінде кең диапазонда реттелетін элементтік және фазалық құрамы, құрылымы мен қасиеттері бар керамика тәрізді жабындар пайда болады.

Микродоғалық оксидтеу керамика тәрізді жабындарды қалыптастырудың күрделі көп факторлы процесі болып табылады, оның тиімділігі, бұл жағдайда уақыт бірлігіне қалыңдығының өсу жылдамдығы мен сапасы, ең алдымен, электр тотығу параметрлеріне байланысты (ток тығыздығы, катод пен анод компоненттерінің қатынасы, кернеу, құрам және концентрация электролит, өңделетін объектінің химиялық құрамы, электродтардың мөлшері мен мөлшері) ұшқынның сипаты мен қарқындылығымен анықталады: [2-3]. МДО қабатын қалыптастыру кезінде оның сапасына көптеген факторлар әсер ететіндігіне байланысты проблемалар туындайды: электролиттің құрамы, концентрациясы және температурасы, өңдеу ұзақтығы, дайындама материалының химиялық құрамы мен құрылымы, сондай-ақ МДТ процесінің электр режимдері. Анодтың химиялық құрамы неғұрлым күрделі болса және анод пен катодтың ауданы неғұрлым көп болса, оксидтеу кезінде ток тығыздығы соғұрлым жоғары болуы керек. Электролиттің химиялық белсенділігі, сонымен қатар уақыт бірлігіне жабын қалыңдығының өсу динамикасына жауап береді, оның құрамына байланысты, оны таңдау шешілетін міндет пен қалыптасатын жабынның сапасы мен қасиеттеріне қойылатын талаптардан туындайды.

Осы зерттеуде қарастырылатын анодты микродоғалық оксидтеу (АМДО) МДО-дан тек анодты ток компонентінің болуымен ерекшеленеді, бұл тармақталған беткі кеуектілігі бар жұқа жабындарды алу арқылы процестің төмен өнімділігін анықтайды. Бірақ бұл ретте энергия тұтыну 30-40%-ға төмен, ал МДО-жабындардың бетінде 75-80% - ға дейін сынғыш, беріктігі жоқ және муллитті фазалардың металымен адгезиясы жоқ болуы іс жүзінде АМДО-жабындардың құрамында жоққа шығарылады. Сондықтан, кейбір жағдайларда белгілі бір мақсаттағы керамика тәрізді жабындарды қалыптастыру үшін оны модернизациялаудың әртүрлі нұсқаларын қолдана отырып, дәл АМДО процесін таңдаған жөн.

Әдеби шолу. Эквивалентті жабындарды алу шарттары, ең алдымен, өнімнің бетіндегі токтың таралуына байланысты. Оксидтелетін заттың айналасындағы ұшқынның табиғаты неғұрлым аз болса, соғұрлым қалыптасқан жабынның қалыңдығы біркелкі өседі. Оксид қабаттарының қалыңдығының өсу қарқыны тек берілген токтың тығыздығына ғана емес, сонымен қатар тотықтырылатын металдың химиялық құрамына, өнімнің пішініне, электролиттің құрамы мен күйіне де байланысты екендігі белгілі [1]. Бұрын [4]-те АМДО тотықтырылған металдың құрамы, электролит күйі және химиялық құрамының жабын қалыңдығының өсу динамикасына әсері талданды, бұл процестің ең аз энергия және материалдық шығындарымен жетілдіру және ұшқындау процесін тұрақтандыру арқылы оның жаңа, перспективалы нұсқасын жасау мақсатында квазикатодтар жүйесін қолдана отырып, жаңа зерттеулер кешенін жүргізу үшін АМДО негізгі факторларын таңдауды оңтайландыруға мүмкіндік берді [5].

Мұндай модернизацияның орындылығы микро разрядтардың тотықтырылатын бетке таралуын басқару мүмкіндігімен және нәтижесінде жақсартылған сапалық сипаттамалары бар жабындарды алу арқылы АМДО процесінің тұрақты жүруімен анықталады.

Осы зерттеуде нақты уақыт режимінде ұшқынның разрядтарын бөлу сипатын белгілеу

арқылы оның стандартты және жаңғыртылған нұсқаларында АМДО әдісімен алынған жабындардың параметрлерін бақылау мүмкіндіктері қарастырылады. Ұшқын разрядтарын бөлу сипатының дәлелі уақыт бойынша ток тығыздығының, жасалған жабындардың қалыңдығының және олардың бетінің кедір-бұдырлық параметрлерінің өзгеруі болып табылады.

Зерттеу әдістері мен материалдары. АМДО процесі трансформатор мен қуат блогын қалыптастыратын жиілігі 150 Гц және амплитудасы 540 В дейін түзетілген кернеудің импульстарын құрайтын үш фазалы қуат көзі бар МДО-2УВИЕ 440.329.005 сериялы қондырғыларында жүзеге асырылды. АМДО процесі тот баспайтын болаттан жасалған электролиттік ваннада жүргізілді, оның қабырғалары мен түбі катод болып табылады.

Осы мақсат шеңберінде эксперименттерді жүзеге асыру үшін біз 08X18H10 маркалы тот баспайтын болаттан жасалған қосымша катодты және ауданы 0,2 дм² АД33 маркалы алюминий қорытпасынан призмалық нысандағы үлгілердің екі тобын дайындадық. Екі топтың АМДО бірдей жағдайларда жүзеге асырылды: гальваностатикалық режимде ток тығыздығы 5 А/дм² және амплитудалық кернеу 250 В электролиттің сулы ерітіндісінде 7 г/л Na₂P₄O₇, 2,5 г/л NaOH. Бұл ретте бірінші топ көрсетілген электролитте квазикатодтарды (бұдан әрі – № 1 үлгісі) қолданбай, ал екіншісі – электролиз ваннасының кеңістігінде бөлшектің катод бетімен кездейсоқ жанасуын болдырмайтындай етіп қосымша катод орнатумен (бұдан әрі – № 2 үлгісі) өңделді. Тотығу ұзақтығы 5 минут болды.

АМДО процесіне үлгілерді дайындау процедурасы анодтауға, химиялық оксидтеуге және басқа процестерге қарағанда әлдеқайда қарапайым, олар үшін алдын-ала химиялық өңдеу, майсыздандыру, тазарту және жуу жұмыстары міндетті болып табылады. Қалыптасқан жабындар бетінің сапалық сипаттамаларын одан әрі зерттеу үшін үлгілердің екі тобының беттерін дайындаудың жалғыз талабы-жабынды жасау процесінде бар кедір-бұдырлардың рельеф параметрлеріне әсерін болдырмау үшін олардың бетін Р600 және Р320 қағаз негізіндегі SiC абразивімен алдын ала тегістеу.

Дайындалған екі сынама тобымен тәжірибе жасау барысында ұсынылған АМДО әдісін модернизациялаудың тиімділігін анықтау үшін біз процестің электрлік сипаттамаларын, алынған жабындардың қалыңдығы мен кедір-бұдырлығын бақыладық.

Электрлік сипаттамалары В-421 сандық осциллографымен бекітілген. Қалыңдығы 1 мкм жабынның пайда болуына энергия шығынын есептеу формулалар бойынша анықталды:

$$P_i = U_i I_i,$$

мұндағы P_i – өлшеу циклі үшін қуат, Вт; U_i – бір өлшеу циклі үшін тиімді кернеу, В; I_i – бір өлшеу циклі үшін тиімді ток, А.

$$A_i = P_i \cdot t_i$$

мұндағы A_i – өлшеу циклі үшін энергия (жұмыс), Дж; $t_i = \Delta t/N$ – өлшеу циклінің орташа ұзақтығы, с ($\Delta t = t_2 - t_1$ – процестің ұзақтығы, с; t_1 – процестің басталу уақыты, с; t_2 – процестің аяқталу уақыты, с; N – өлшеу циклдерінің саны).

Онда

$$A = \sum_{i=1}^N A_i = \sum_{i=1}^N P_i \cdot \frac{\Delta t}{N}$$

мұндағы A – процестің өту кезіндегі энергия (жұмыс), Дж; $A_i = a/h$ – жабынның 1 мкм

өсуіне жұмсалған энергия (жұмыс), Дж/мкм; h – жабынның қалыңдығы, мкм. $V_{МКМ}$ жабынның өсу жылдамдығын есептеу келесі өрнек бойынша жүргізілді.

$V_{МКМ}$ жабынның өсу жылдамдығы келесі өрнекпен есептелінді:

$$V_{МКМ} = \frac{h}{\Delta t}$$

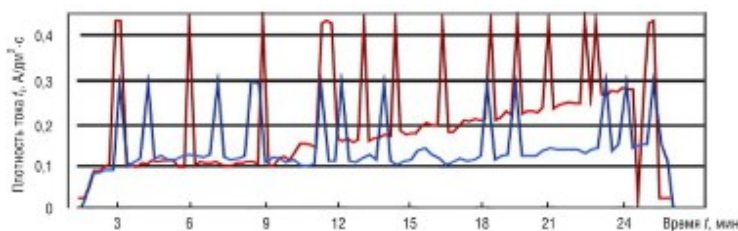
Есептеу әдісі «Константа К-5» (ТУ 74.06.400.000.00) геометриялық параметрлерді өлшейтін көп функциялы аспаптың немесе ұқсас үлгідегі аспаптың көмегімен қалыңдығын бағалау арқылы тексерілді. Әдістемелік өлшеулер құрылғыға қоса берілген нұсқаулыққа сәйкес жүргізілді.

Өлшеулер қалыптасқан жабындардың бүкіл бетінде жүргізілді, бұрын оны қарындашпен бірдей ұшықтармен тормен белгілеп, қабаттың орташа қалыңдығын және тепе-теңдіктен ауытқуларды анықтады. Алынған мәліметтерді математикалық өндеуден кейін жабынның бетіндегі қалыңдықтың өзгеруін көрсететін қисықтар жасалды.

Зонд әдісімен беттерді зерттеу бірнеше сатыда жүргізілді: алдымен зерттелетін объектінің профилі бірнеше рет «сезілді», содан кейін өлшеу сериясының негізінде параметрдің орташа мәні есептелді, ол учаскенің ұзындығына қатысты бұзылудың сандық көрінісі ретінде сипатталды.

Зерттеу бөлімі. АД33 алюминий қорытпасының оксидтеу ерекшеліктерін типтік әдіспен және электролиз ваннасында қосымша катодты орналастырумен зерттеу кезінде біз ұшқынның сипаты, қарқындылығы мен жарықтығы өзгеретінін байқадық. Жабындардың өсу кинетикасын бақылау және басқару құрылғысы арқылы бекітілген ең қарқынды, тығыз және жарқын ұшқын, қосымша катоды бар электр троллитінде АМДО кезінде байқалады. Бұл әсердің түсіндірмесі автоматтандырылған ақпараттық-өлшеу кешенінің (АӨК) көмегімен онлайн режимінде алынған процестің ағымдағы сипаттамаларын өлшеу нәтижелері болып табылады.

Стандартты режимде АМДО процесі кезінде және қосымша катод орналастырылған электролитте нақты уақыт режиміндегі ток сипаттамаларының өзгеруі кезінде біз олардың деңгейлерінде айырмашылықты тіркедік: егер АМДО стандартты электролитінде ток тығыздығының орташа мәндері жабдықтың көмегімен берілген мәндерге сәйкес келсе, онда жаңартылған нұсқада, басқа параметрлермен бірдей, тотығу параметрлері – ток тығыздығы, өңдеу уақыты және тотықтырылатын үлгілердің бірдей мөлшері – жоғары, 1,2-1,6 есе, ток тығыздығы байқалады (1-сурет). [4, 5] белгілі болғандай, ток тығыздығы жоғарылаған сайын, қалыптасқан жабындардың қалыңдығының өсу қарқыны артады, бірақ өсу процесі біркелкі емес және аз тұрақты болады, сонымен қатар жасалған беттің сапасын анықтайды. Сондықтан ұшқынның күшеюі түзілетін оксид қабаттарының беткі сапасының нашарлауына әкелетінін анықтау қажет болды.



1-сурет. Стандартты режимде (төменгі осциллограмма) және қосымша катодпен (жоғарғы осциллограмма) АМДО кезінде нақты уақыт режиміндегі ток тығыздығының өзгеруі

Біз қосымша катодты электролиттегі ток тығыздығының барлық диапазонында процестің бірдей ұзақтығымен жабынның қалыңдығы стандартты әдіспен алынған жабынның қалыңдығынан едәуір көп екенін анықтадық. Бұл жағдайда қабат қалыңдығының өсу сипаты тегіс және біркелкі болады.

Сонымен қатар, АМДО типтік процесін ток тығыздығының жоғарылауымен 5 минут ішінде жүргізу жабын қалыңдығының өсу қарқынының төмендеуіне әкелетіні белгілі болды, бұл өсу қисығының максималды шығуымен расталады, содан кейін жабын қалыңдығының өсуі іс жүзінде тоқтайды. Типтік әдіспен 20 минуттық тотығудан кейін Δ өзгерісін сипаттайтын қисықтың табиғаты үлкен ток тығыздығы диапазонында қабат қалыңдығының өсу қарқынының біршама баяулауын көрсетеді [13].

Қосымша катоды бар электролитте жоғары ток тығыздығында процесті жүргізу кезінде жабынның қалыңдығы қисығы АМДО ұзақтығына қарамастан монотонды тұрақты көтерілуді көрсетеді, бұл ұшқын процесінің тұрақтануын және тотығудың біркелкі жүруін көрсетеді.

Микродоғалық оксидтеу сипатының қалыптасқан қабаттардың құрылымдық және сапалық сипаттамаларына әсерін ескере отырып, осы зерттеудің авторлары қосымша катодпен модернизацияланған әдіспен алынған жабын беті жоғары сапалы болуы керек деген болжам жасады.

Сапаның анықтайтын сипаттамаларының бірі тегіс және біркелкі рельеф болып табылады, оның көрсеткіші кедір-бұдыр параметрлері болып табылады. Типтік әдіспен және квазикатодтың қатысуымен пайда болған жабын беттерінің кедір-бұдырлығын бақылай отырып, біз әртүрлі параметрлердің сипаттамалары беттің көптеген функционалды қасиеттерін анықтайтындығын ескереміз [6,12]: жұптау сапасы (қону), тозуға төзімділік, байланыс күші, шағылысу қабілеті, жылу беру, майлауды сақтау, адгезия және т.б. параметрлері анодты микродоғалы тотығу кезінде масса алмасу процесі туралы және металл-электролит жүйесіндегі физика-химиялық өзара әрекеттесу шарттары туралы түсінік беріп қана қоймай, сонымен қатар әртүрлі жұмыс жағдайларында алынған беттің жұмыс қасиеттерін болжауға мүмкіндік береді.

Сондықтан өлшеу кезінде біз [7]-де көрсетілген кедір-бұдырлық көрсеткіштерін бекіту үшін қолданылатын жабдықтың барлық мүмкіндіктерін қолдандық. Бұл ретте өлшеу хаттамаларында осы сандық көрсеткіштерді алу шарттары кестеде көрсетілген.

Осылайша, бағаланатын профильді сипаттайтын бұзушылықтарды анықтауды біз 0,25 мм базалық ұзындықта жүргіздік (қадамды кесу). Осылайша, бетті бағалау кезінде тым ұзын профиль элементтері ескерілмеген.

Негізгі ұзындық сандық түрде профиль сүзгісінің толқын ұзындығына тең, ол кедір-бұдырлыққа қатысты бұзылуларды толқын ұзындығынан бөледі. Барлық дерлік параметрлер базалық ұзындықта бағаланды, бірақ егер олардың орташа мәні бірнеше негізгі ұзындықта ескерілсе, өлшеу дәлдігі артады. Сондықтан профильді бағалау үшін біз 5 базалық ұзындықты қолдандық, олар 1,25 мм бағалау ұзындығы болып табылады.

Профиль профильдері бақыланатын бет туралы идеяларды едәуір кеңейтеді (2-сурет).

Кесте. Зерттелетін беттің кедір-бұдырлық параметрлері

Зерттелетін беттің кедір-бұдырлық параметрі	Зерттелетін беттің ауқымдылығы параметрінің сандық көрсеткіші
---	---

	№ 1 Үлгі	№ 2 Үлгі
Негізгі ұзындығы λ_s , мм	0,250	0,250
Трассалау ұзындығы λ_t , мм	1,750	1,750
Қысқа толқындарды кесу λ_s , мкм	2,5	2,5

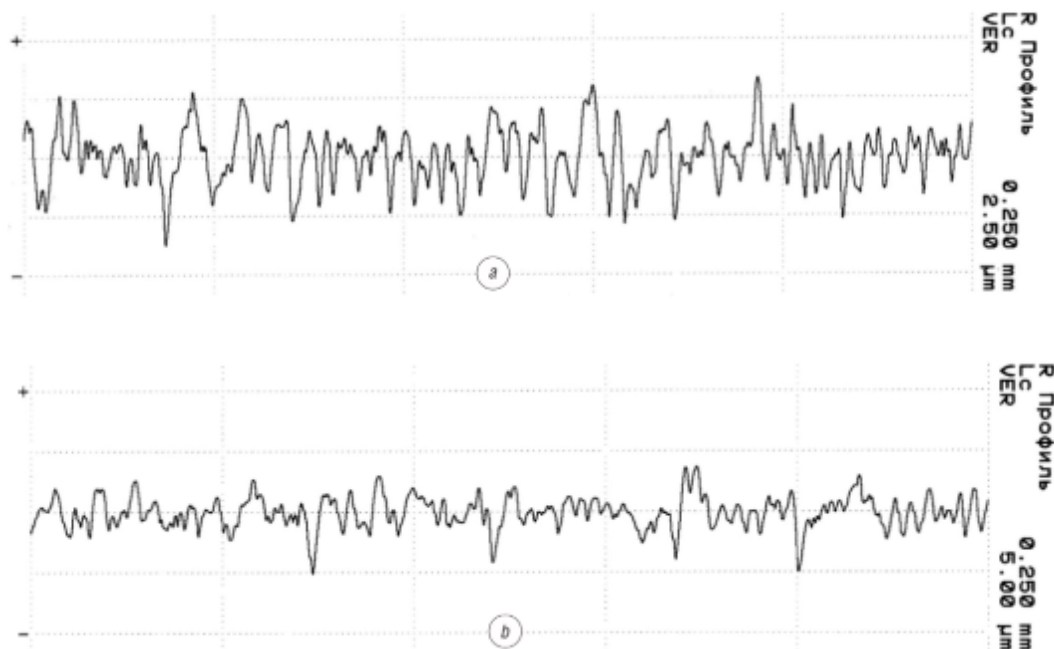
Кестенің жалғасы

Зерттелетін беттің кедір-бұдырлық параметрі	Зерттелетін беттің ауқымдылығы параметрінің сандық көрсеткіші	
	№ 1 Үлгі	№ 2 Үлгі
Профилінің арифметикалық орташа ауытқуы R_a , мкм	0,905	0,999
Профилінің орташа квадраттық ауытқуы R_q , мкм	1,151	1,299
Профильдің кедір-бұдырлығының орташа максималды биіктігі (DIN, ISO) R_z , мкм	5,69	6,99
Профиль элементтерінің орташа максималды биіктігі (JIS) R_zJ , мкм	3,10	3,54
Профиль шығыңқы максималды биіктігі (DIN, ISO) R_p , мкм	2,81	2,94
Профиль шығыңқы жерінің орташа максималды биіктігі (ASME) R_{pm} , мкм	2,81	2,94
Редукцияланған шығыңқы жерлерінің биіктігі R_{pk} , мкм	1,25	1,33
Редукцияланған шығыңқы жерлерінің максималды биіктігі R_{pkx} , мкм	2,13	2,05
Кедір-бұдырлық бейіні негізінің биіктігі R_k , мкм	2,6	3,24
Редукцияланған ойпаттардың тереңдігі R_{vk} , мкм	1,27	1,79
Редукцияланған ойпаттардың максималды тереңдігі R_{vkk} , мкм	2,62	3,68
Кедір-бұдырлық профилінің негізі материалының ең аз коэффициенті $Mf1$, %	9,6	9,3
Кедір-бұдырлық профилінің негізі материалының ең үлкен коэффициенті $Mf2$, %	83	91
Профильдің толық биіктігі R_T , мкм	7,10	8,86
Кедір-бұдырлық профилінің базалық тереңдігі R_{3z} , мкм	3,83	3,67
Шығыңқы жерлерінің тығыздығы R_{Pc} (0,1; -0,1), / см	352	360
Профильдегі кедір-бұдырлардың орташа ені R_{Sm} , мкм	35	47
Профильдің жергілікті шығыңқы жерлерінің орташа қадамы S , мкм	25	23
Қайталанатын кедір-бұдырлық элементтерінің орташа тереңдігі R , мкм	5,19	5,04
Профильдің ең үлкен кедір-бұдырлық тереңдігі R_x , мкм	7,13	9,74
Қайталанатын кедір-бұдырлық элементтерінің жиынтық ені A_g , мкм	124	103
Материалды ұсақтау коэффициенті (профильдің салыстырмалы ұзындығы) R_{mr} , %		
R_{mr} (1,76; 5,0)	-	0
R_{mr} (1,41; 5,0)	0	-
R_{mr} (0; 5,0)	5	5
R_{mr} (-1,00; 5,0)	19	20
R_{mr} (-2,00; 5,0)	55	50
R_{mr} (-3,00; 5,0)	81	79

Rmr (-4,00; 5,0)	96	95
Rmr (-5,00; 5,0)	100	98
Rmr (-6,00; 5,0)	-	99
Rmr (-7,00; 5,0)	-	100

Кестенің соңы

Зерттелетін беттің кедір-бұдырлық параметрі	Зерттелетін беттің ауқымдылығы параметрінің сандық көрсеткіші	
	№ 1 Үлгі	№ 2 Үлгі
Профиль қималарындағы биіктік айырмасы R _{δс} , мкм		
R _{δс} (5,0; 15)	0,82	0,75
R _{δс} (20, 80)	1,92	2,03
R _{δс} (85, 98)	1,20	1,96
RMR ҚИСЫҒЫ		
L _с	0,250	0,250
VER	2,5	5,0
HOR	20	20

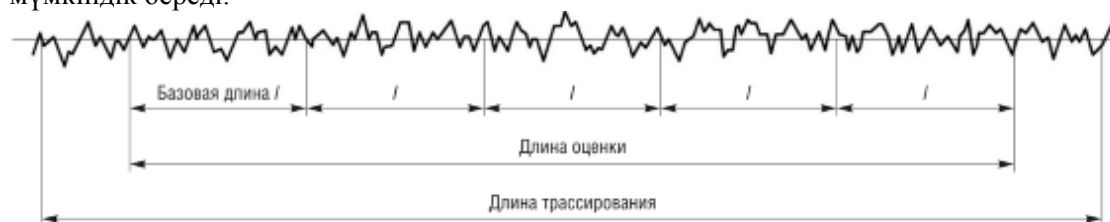


2-сурет. Жабын беттерінің профилограммалары: а – № 1 үлгі бетінде; б – № 2 үлгі бетінде

Өлшеу басында құрылғының зондының үдеуінің әсерін және оның соңында баяулауын болдырмау үшін өлшеу бақылау ұзындығында жүргізілді, ол әдетте бағалау ұзындығынан үлкен және 1,75 мм құрайды (3-сурет).

Кедір-бұдырды беттің қысқа толқын ұзындығынан ажырату үшін құрылғы 2,5 мкм қысқа толқын кесу сүзгісін қолданады. Ол болмаған жағдайда механикалық сүзгілеу әсері өте қысқа толқындарды (2 мкм) кесетін зондты жасайды.

Классикалық АМДО технологиясын (№ 1 үлгісі) және қосымша катодпен жетілдірілген технологияны (№ 2 үлгісі) қолдана отырып жасалған үлгілер үшін осы сандық көрсеткіштерді салыстырмалы бағалау (кестені қараңыз) бірқатар тұжырымдар жасауға мүмкіндік береді.



3-сурет. Негізгі ұзындық, бағалау ұзындығы және бақылау ұзындығы

R_a , R_q , R_z , R_zJ , R_p , R_{3z} , R_t сияқты беткі профильдің амплитудалық параметрлері екі жағдайда да төтенше және аз ақпарат болып табылады. Бұл параметрлердің мәні беттің рельефін беттің орташа элементтерімен сипаттайды немесе кездейсоқ функциялармен сипатталады немесе оның мәндерінің шашырауына әкелетін параметрді анықтауға байланысты болады, бұл зерттелетін беттің рельефінің ерекшеліктері туралы қорытынды жасауға мүмкіндік бермейді, нәтижесінде қосымша катодтың болуымен немесе болмауымен анықталатын МДО ерекшеліктеріне байланысты масса алмасу процесі электролиз ваннасында. Бірақ тұтастай алғанда, берілген жағдайларда модернизацияланған технология бойынша жасалған үлгілер үшін амплитудалық параметрлердің 10-нан 30 %-ға дейін арту заңдылығы анықталды.

R_{pm} және R_z сияқты жеке амплитудалық параметрлердің үйлесімі профильдің біркелкі еместігін және нәтижесінде беттің тірек немесе жылжымалы қасиеттерін анықтау үшін пайдалы. Сонымен, зерттеу хаттамасына сәйкес, жетілдірілген қосымша катод әдісімен жасалған үлгілер профильдің асимметриясына ие емес, бұл кеуекті және керамикалық беттерге тән [11]. Осылайша, № 2 үлгісінің қуыстарының ауданы №1 үлгісімен салыстырғанда аз көлемді алады деп қорытынды жасауға болады. Бұл жылдамдықты өзгерту туралы әкелетін иондар бетіне бөлшектер – анодты, ал қайта бөлу туралы бойынша бетінің бөлшектер микроразрядов туындайтын жерде ғана жабын қалыңдығы аз. Бұл қосымша катодты қолдану қалыңдығы біркелкі оксид қабатын алуға кепілдік бере отырып, өнімнің бетіне ток тығыздығының біркелкі таралуына әкелетінін білдіреді.

Микроазрядтарды бөлшектің беті бойынша қайта бөлудің салдары олардың беті бос болатын аймақта пайда болуы болып табылады, осылайша № 1 үлгісімен салыстырғанда №2 үлгісі үшін профильдің (шығыңқы жерлердің) тән элементтерінің саны артады.

Бұл нәтиже R_{Pc} шығыңқы тығыздығын сипаттайтын қадам параметрін, сондай-ақ S профилінің шығыңқы орташа қадамын, A_g жалпы енін және кедір-бұдырлық элементтерінің R орташа тереңдігін анықтайтын параметрлерді растайды (2-суретті қараңыз). Осы параметрлердің үйлесімі профильдің өткірлігін анықтайды, бұл өз кезегінде материалдың электрлік немесе жылу өткізгіштігіне және жанасатын беттердің тікелей атомдық өзара әрекеттесу нүктелерінде болатын басқа процестерге әсер етеді.

Мүлдем басқа профильге ие беттер бірдей R_a мәндеріне ие болуы мүмкін. Сонымен қатар, бұл параметр әртүрлі технологиялық процестерді қолдану арқылы алынған беттер үшін аз ақпарат береді [10].

Тағы бір амплитудалық параметр – бағаланатын профильдің R_q орташа квадраттық ауытқуы R_a параметріне балама болып табылады, өйткені екеуі де орташа мән болып

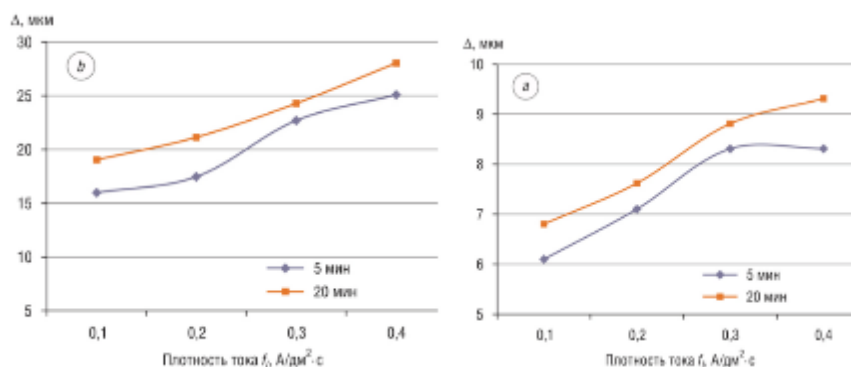
табылады. Алайда, Rq профиль биіктіктерінің таралуының орташа квадраттық ауытқуы болғандықтан және кездейсоқ функциялармен сипатталған профильдерді сипаттай алатындығына байланысты, ол жылтырату немесе әрлеу арқылы алынған таза беттерді бағалау үшін қолданылады. Қарастырылып отырған өңдеу әдісі үшін бұл параметр Ra сияқты ақпарат бермейді және қосымша катодтармен немесе онсыз үлгілерде оксидті жабынды қалыптастыру процесінің тиімділігі туралы түсінік бере алмайды.

RZ профилинің бұзылуының орташа максималды биіктігі-түсіндіру қиын амплитудалық параметр, кем дегенде бес түрлі анықтамаға ие. [15] авторлары оны кедір-бұдыр профилинің бес қадамының әрқайсысында шығыңқы және қуыс арасындағы максималды қашықтықтың орташа мәні ретінде анықтайды.

Нәтижелері және оларды талқылау. Бұл жұмыста екі жолмен алынған жабындардың сапасының негізгі көрсеткіштері бағаланады: қалыңдығының өсуі, өсу жылдамдығы мен сипаты, тотығу динамикасын анықтайтын анод тогының тығыздығына және электролиз ваннасында қосымша катодтың болуы немесе болмауы.

Зерттелген әдістермен алынған жабындардың қалыңдығын өлшеу АМДО процесінде қосымша катодты қолданған жағдайда оның қарқынды өсуін көрсетті (4-сурет). Өлшеулер 5 және 20 минут тотығудан кейін жүргізілді.

Алынған қисықтарды талдау екі жағдайда да АМДО уақытының ұлғаюы қалыптасқан жабынның қалыңдығының артуына әкелетінін көрсетті, бірақ оның өсу сипаты әртүрлі.



Сур. 4. Үлгілік процесті (а) және қосымша катодпен (б) процесті жүргізу кезінде АМДО белгіленген уақыт ішіндегі жабын қалыңдығының өсуі

Осы зерттеу барысында алынған RZ және RzJ сандық мәндері айтарлықтай өзгереді. Сонымен, №1 үлгісі үшін Rz 5,69 мкм, ал RzJ 3,10 мкм құрайды. № 2 үлгісі үшін Rz 6,99 мкм, ал RzJ 3,54 мкм құрайды. Осылайша, қолданылатын анықтамаға байланысты профильдің кедір-бұдырларының орташа биіктігі 50 % шегінде ауытқуы мүмкін. Сонымен қатар, үлгілерді модернизацияланған әдіспен өңдегеннен кейін Rz 23 %-ға және RzJ – 14 %-ға арту заңдылығы анықталды.

Зерттелетін үлгілерде алынған жабын беттерінің профилинің кейбір амплитудалық параметрлерін бағалай отырып, олардың ішіндегі ең көп тарағаны Ra арифметикалық орташа ауытқуы болып табылады, ол базалық ұзындық шегінде Z(x) ординаттарының абсолютті мәндерінің арифметикалық ортасы болып табылады, біз зерттелген үлгілер үшін бұл параметр аздап ерекшеленетінін анықтадық: № 1 үлгісі үшін Ra = 0,905 мкм, №2 үлгі үшін – Ra = 0,999 мкм, яғни бұл параметр бойынша кедір-бұдырдың өсуі тек 10 % құрады.

Кедір-бұдыр профилінің орташа амплитудасын сипаттай отырып, бұл атиптік емес шығыңқы жерлер немесе депрессиялар R_a мәніне аздап әсер етеді деп қорытынды жасауға болады.

Қорытынды. Жүргізілген зерттеулер электролиз ваннасында қосымша катодты қолдану арқылы оның ұшқынның өзгерген жағдайларына әсерін, жабын қалыңдығының өсуін және оның рельефі параметрлерінің өзгеруін анықтау арқылы ұсынылған АМДО әдісін модернизациялаудың тиімділігін бағалауға мүмкіндік берді. Қосымша катодтарды қолдану бөліктің бетіндегі микро ұшқынның қарқындылығы мен тығыздығын арттырады, бұл оксид жабындарын қамтитын сынғыш беттерге тән емес асимметрия көрсеткіштері бар беттің тығыз рельефін алуға әкеледі.

МДО кезінде бөлшек пен электролит арасында көлемді ұшқын разрядтарының пайда болу жағдайларын жоюға арналған тәсіл әзірленді. Ол импульстік токты бере отырып (химиялық-термиялық өңдеу, электрохимиялық өлшемдік өңдеу және т.б.) электролиттерде металдарды өңдеудің басқа әдістерін қолдана отырып, технологиялық процестерді ұйымдастыруда қолданылуы мүмкін.

Электролит пен бөліктің бөлме температурасында анодты микродоғалық оксидтеу процесі жүзеге асырылды.

Негізінен жоғары қаттылық оксидінен тұратын АМДО қабатының пайда болу мүмкіндігін анықтайтын импульстердің параметрлері анықталды. Үлкен диаметрлі тесіктердің айналасында пайда болатын модификацияланған материал көлемдерінің суперпозициясы арқылы қалың жұмыс кабаттарын құру мүмкіндігі көрсетілген.

Осылайша, процестің тиімділігінің критерийлері кедір-бұдырлықтың амплитудалық және кадамдық параметрлері бола алады, бұл қалыптасқан оксид жабынының микропрофилін объективті бағалауға мүмкіндік бермейді, дегенмен оның қалыңдығының өсу сипаты мен сапаның өзгеруі туралы көбірек ақпарат бере алады, нәтижесінде осындай жабындысы бар металл заттардың пайдалану деңгейінің деңгейін анықтайды.

Әдебиеттер тізімі

1. Технологические возможности микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / А.Е. Михеев [и др.] // Вестн. машиностроения. – 2003. – № 2. – С. 56-63.
2. Михеев А.Е. Влияние параметров процесса МДО на формирование покрытий в электролитических растворах / А.Е. Михеев, В.В. Стацур, Н.В. Никушкин // Материалы, технологии, конструкции: сб. науч. тр. – Красноярск, 1995. – С. 144-146.
3. Федоров В.А. Формирование упрочненных поверхностных слоев методом микродугового оксидирования в различных электролитах и при изменении токовых режимов / В.А. Федоров, В.В. Белозеров, Н.Д. Великосельская // Физика и химия обработки материалов. – 1991. – № 1. – С. 87-93.
4. Чигринова Н.М. Интенсификация процессов микроплазменного упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности электромеханическим воздействием: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Н.М. Чигринова. – Минск, 2009. – 371 л.
5. Чигринова Н.М. Влияние квазикатодов на формирование равнотолщинных слоев при микродуговом оксидировании вентильных металлов / Н.М. Чигринова, Е.И. Воробьева // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25-27 янв. 2018 г. – Минск, 2018. – С. 346-349.
6. Табенкин А.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов; под ред. Н.А. Табачниковой. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 136 с.
7. Dagnall H.M.A. Exploring surface texture / H.M.A. Dagnall. – Leicester, England: Rank Taylor Hobson, 1980. – 170 p.
8. Белозеров В.В. Метод микродугового оксидирования и его перспективы / В.В. Белозеров, А.И. Махатилова, Е.М. Реброва // Штрипс. – 2008. – № 3. – С. 30-32.
9. Микродуговое оксидирование (обзор) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др. //

- Приборы. – 2001. – № 9. – С. 13-23.
10. Гордиенко, П.С. О кинетике образования МДО-покрытий на сплавах алюминия / П.С. Гордиенко, В.С. Руднев // Защита металлов, 1990. – Т. 6, № 3. – С. 467-470.
 11. Малышев В.Н., Марков Г. А., Федоров В.А. Особенности строения и свойства покрытий, наносимых методом микродугового оксидирования // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1984. – №1. – С. 26-27.
 12. Тимшенко А.В., Опара Б.К. Влияние наорденного переменного тока на состав и свойства оксидных покрытий, формируемых в микроплазменном режиме. – М.: Машиностроение, 1994. – 150 с.
 13. Гордиенко П.С. Образование покрытий на анодно-поляризованных электродах в водных электролитах при потенциалах искрения и пробоя / П.С. Гордиенко. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 216 с.
 14. Модель перехода анодирования в микродуговой режим / В.И. Белеванцев и др. // Изв. Со Ан СССР. Сер. «Хим.науки», 1989. – Вып. 6. – С. 73-81.
 15. Шрейдер А.В. Оксидирование алюминия и его сплавов. – М.: Машиностроение, 1960. – 220 с.
 16. Тихонов В.Н. Аналитическая химия алюминия. – М.: Наука, 1971. – 266 с.

References

1. Tekhnologicheskie vozmozhnosti mikrodugovogo oksidirovaniya alyuminievyh splavov / A.E. Miheev [i dr.] // Vestn. mashinostroeniya. – 2003. – №2. – С. 56-63.
2. Miheev, A.E. Vliyaniye parametrov processa MDO na formirovaniye pokrytij v elektroliticheskikh rastvorah / A.E. Miheev, V.V. Stacura, N.V. Nikushkin // Materialy, tekhnologii, konstrukcii: sb. nauch. tr. – Krasnoyarsk, 1995. – S. 144-146.
3. Fedorov, V.A. Formirovaniye uprochnennyh poverhnostnyh sloev metodom mikrodugovogo oksidirovaniya v razlichnyh elektrolitah i pri izmenenii tokovyh rezhimov / V.A. Fedorov, V.V. Belozarov, N.D. Velikosek'skaya // Fizika i himiya obrabotki materialov. – 1991. – №1. – S. 87–93.
4. CHigrinova, N.M. Intensifikaciya processov mikroplazmoiskrovogo uprochneniya i vosstanovleniya metallicheskih izdelij povyshennoj tochnosti elektromekhanicheskim vozdeystviem: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.02.07 / N.M. CHigrinova. – Minsk, 2009. – 371 l.
5. CHigrinova, N.M. Vliyaniye kvazikatodov na formirovaniye ravnotolshchinyh sloev pri mikrodugovom oksidirovanii ventil'nyh metallov / N.M. CHigrinova, E.I. Vorob'eva // Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike: materialy 16-j Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Minsk, 25–27 yanv. 2018 g. – Minsk, 2018. – S. 346–349.
6. Tabenkin, A.N. SHerohovatost', volnistost', profil'. Mezhdunarodnyj opyt / A.N. Tabenkin, S.B. Tarasov, S.N. Stepanov; pod red. N.A. Tabachnikovoj. – SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2007. – 136 s.
7. Dagnall, H. M. A. Exploring surface texture / H. M. A. Dagnall. – Leicester, England: Rank Taylor Hobson, 1980. – 170 p.
8. Belozarov, V.V. Metod mikrodugovogo oksidirovaniya i ego perspektivy / V.V. Belozarov, A.I. Mahatilova, E.M. Rebrova // SHtrips. – 2008. - № 3. – S. 30-32.
9. Mikrodugovoe oksidirovaniye (obzor) / I.V. Suminov, A.V. Epel'fel'd, V.B. Lyudin i dr. // Pribory. – 2001. – №9. – S. 13-23.
10. Gordienko, P.S. O kinetike obrazovaniya MDO-pokrytij na splavah alyuminiya / P.S. Gordienko, V.S. Rudnev // Zashchita metallov, 1990. – Т. 6, № 3. – С. 467-470.
11. Malyshev V.N., Markov G. A., Fedorov V.A. Osobennosti stroeniya i svojstva pokrytij, nanosimyh metodom mikrodugovogo oksidirovaniya // Himicheskoe i neftyanoe mashinostroenie. – 1984. – №1. – S. 26-27.
12. Timshenko A.V., Opара B.K. Vliyaniye naordenogo peremennogo toka na sostav i svjostva oksidnyh pokrytij, formiruemyh v mikroplazmennom rezhime. M.: Mashinostroenie, – 1994. – 150s.
13. Gordienko P.S. Obrazovaniye pokrytij na anodno-polyarizovannyh elektrodah v vodnyh elektrolitah pri potencialah iskreniya i proboya / P.S. Gordienko. Vladivostok : Dal'nauka; – 1996. – 216s.
14. Model' perekhoda anodirovaniya v mikrodugovyj rezhim / V.I. Belevancev i dr. // Izv. So An SSSS. Ser. «Him.nauki», – 1989. Vyp. 6. – S. 73-81.
15. SHrejder A.V. Oksidirovaniye alyuminiya i ego splavov, M.: Mashinostroenie, – 1960. – 220s.
16. Tihonov V.N. Analiticheskaya himiya alyuminiya. M.: Nauka, – 1971. – 266s