

А.А. ЖУМАЛИЕВА¹, Ш.Р. КУРБАНБЕКОВ², И.Б. УСЕМБАЕВА³

¹Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінің магистранты
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: zhumaliyeva.aidana98@mail.ru

²PhD, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінің доценті
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

³PhD, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық
қазақ-түрік университетінің аға оқытушысы
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: indira.usembayeva@ayu.edu.kz

БОЛАТТАРДЫҢ ФИЗИКА МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТІНЕ ЭЛЕКТРОЛИТТІ ПЛАЗМАЛЫҚ ӨНДЕУДІҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа. Бұл мақалада әртүрлі зерттеу жұмыстарының электролиттік плазмалық термиялық өңдеу беттік қабатты өңдеу процессінде жалпы атауымен жіктелген салыстырмалы түрде жаңа электрохимиялық өңдеу процестері бойынша зерттеу деректеріне шолу берілген. Шолу осы жаңа өнеркәсіптік көзқарас процесі және оны қамту бойынша зерттеу жұмысын кеңейту үшін жасалады. Беткі қабатты өзгерту және жабу үшін оны пайдалану перспективаларына ерекше назар аударылады. Әртүрлі металдардың беткі қасиеттерін жақсарту процесінің мүмкіндіктерін көрсету үшін электролиттік плазмалық өңдеудің әртүрлі түрлері талқыланды. Қолданыстағы термиялық өңдеу процестерімен салыстырғанда өңдеу аз уақытты алады, үнемді, экологиялық таза және динамикалық болып табылады. Оның динамикалық қабілеті кішкене өзгерістерді енгізу арқылы бір эксперименттік қондырғыда қатайту үшін цементтеу, азоттау, жабу, тазалау, жылтырату және т.б. операцияларды орындауға мүмкіндік береді. Электролиттердің өңдеу режимдері мен құрамы, өңделген қабаттардың құрылымдық ерекшеліктері, олардың микроқаттылығы мен бетінің кедір-бұдырлығы, әртүрлі орталарда трибологиялық және коррозияға қарсы, яғни физика механикалық қасиеттері бойынша сынау деректері көрсетілген. Жалпы болаттар тозуға қарсы және коррозияға төзімділігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік беретін өңдеу жағдайлары анықталды. Электролиттік-плазмалық өңдеудің болашағы туралы тұжырым жасалды, осы әдістің артықшылықтары мен кездесетін шектеулері, оның ішінде одан зерттеудің одан ары күтілетін бағыттары атап өтілді.

Кілт сөздер: Электролиттік-плазмалық өңдеу, цементтеу, азоттау, борлау, тозуға төзімділігі, микроқаттылық.

А.А. Zhumaliyeva¹, Sh.R. Kurbanbekov², I.B. Usembayeva³

¹Master's student of Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University
(Kazakhstan, Turkistan), e-mail: zhumaliyeva.aidana98@mail.ru

²PhD, associate professor of
Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University
(Kazakhstan, Turkistan), e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

³PhD, senior lecturer of Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University
(Kazakhstan, Turkistan), e-mail: indira.usembayeva@ayu.edu.kz

Influence of electrolytic plasma treatment on the physical and mechanical properties of steels

Abstract. This article presents an overview of research data on new electrochemical processing processes, classified under the general name of the process of electrolytic-plasma surface heat treatment from various research papers. The review is made to expand the research work on this new process of industrial vision and coverage. Particular attention is paid to the prospects of its use for modifying and coating surfaces. Various types of electrolytic plasma treatment have been discussed to illustrate the possibilities of the process for improving the surface properties of various metals. Compared to existing heat treatment processes, the treatment takes less time, is economical, environmentally friendly and dynamic. Its dynamic capabilities include carburizing, nitriding, plating, cleaning, polishing, etc. to harden in one pilot plant by making small changes to enable operations. The processing modes and composition of electrolytes, structural features of the processed layers, their microhardness and surface roughness, tribological and anticorrosion, i.e. physical and mechanical properties in various environments. In general, processing modes have been determined that allow a significant increase in the antiwear and corrosion resistance of steels. A conclusion is made about the prospects of electrolytic-plasma treatment, the advantages and limitations of this method are noted, including the proposed directions for further research.

Keywords: Electrolyte-plasma treatment, cementation, nitriding, boration, wear resistance, microhardness.

А.А. Жумалиева¹, Ш.Р. Курбанбеков², И.Б. Усембаева³

*¹магистрант Международного казахско-турецкого университета
имени Ходжи Ахмеда Ясауи*

(Казахстан, г. Туркестан), e-mail: zhumaliyeva.aidana98@mail.ru

*²PhD, доцент Международного казахско-турецкого университета
имени Ходжи Ахмеда Ясауи*

(Казахстан, г. Туркестан), e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

³PhD, старший преподаватель

Международного казахско-турецкого университета имени Ходжи Ахмеда Ясауи

(Казахстан, г. Туркестан), e-mail: indira.usembayeva@ayu.edu.kz

Влияние электролитной плазменной обработки на физико-механические свойства сталей

Аннотация. В данной статье представлен обзор данных исследований относительно новых процессов электрохимической обработки, классифицируемых под общим названием процесса электролитно-плазменной термической обработки поверхности из различных исследовательских работ. Обзор сделан для расширения исследовательской работы по этому новому процессу промышленного зрения и охвата. Особое внимание уделено перспективам его использования для модификации и покрытия поверхностей. Были обсуждены различные виды электролитно-плазменной обработки, чтобы проиллюстрировать возможности процесса улучшения свойств поверхности различных металлов. По сравнению с существующими процессами термообработки обработка занимает меньше времени, является экономичной, экологически чистой и динамичной. Его динамические возможности включают цементирование, азотирование, покрытие, очистку, полировку и т.д. для упрочнения в одной экспериментальной установке путем внесения небольших изменений позволяет выполнять операции. Показаны режимы обработки и состав электролитов, особенности строения обрабатываемых слоев, их микротвердость и шероховатость поверхности, трибологические и антикоррозионные, т.е. физико-механические свойства в различных средах. В целом определены режимы обработки, позволяющие значительно повысить противозносную и коррозионную стойкость сталей. Сделан вывод о перспективах

электролитно-плазменной обработки, отмечены преимущества и ограничения этого метода, в том числе предполагаемые направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: Электролитно-плазменная обработка, цементация, азотирование, борирование, износостойкость, микротвердость.

Кіріспе

Болаттан жасалған бұйымның беткі қабаты бор, азот, цемент арқылы қаныққан өңдеу өнеркәсіптік ауқымда салыстырмалы түрде кеңінен қолданыла бастады. Электролит-плазмалық металдар мен қорытпаларды өңдеу жаңа технологиялық мүмкіндіктерімен зерттеушілердің назарын аударатыны белгілі [1]. Металдардың бетін өңдеу қызмет ету мерзімін ұзарту, пайдалану сипаттамаларын жақсарту және металл компоненттеріне эстетикалық көрініс беру үшін жүзеге асырылады. Болаттың тозуға төзімділігі, қаттылығы және коррозияға төзімділігі сияқты беттік қасиеттерін қатайту, азоттау, карбюрзация және нитрокарбонизацияны қамтитын бетті өзгерту процестері арқылы жақсартуға болады. Сол сияқты, белгілі бір материалдың қорғаныс қабатын металдардың бетіне де қолдануға болады [2].

Болат әр компонентті өндіруде қолданылатын өнеркәсіпте беткі қабатты жақсарту болатқа қажетті механикалық қасиеттер беруде маңызды рөл атқарады. Пресс-кұралдар цехтары, автомобиль компаниялары, пресс бөлшектерін өндірушілер, аэроғарыш өнеркәсібі, кеме жасау, биомедициналық жабдықтар өндірісі, қару - жарақ өнеркәсібі, бұның барлығы болат қарапайым металл болып табылатын салалар, сондықтан болаттың қасиеттерін әр түрлі әдістермен жақсарту маңызды болады [3].

Дәстүр бойынша, тек болатты жылыту және салқындату уақыт өте келе бетті өңдеудің ең кең таралған әдісі болды, бетті өңдеудің әртүрлі әдістері дамыды. Кәдімгі термиялық өңдеу металды пеште қыздырудан және ауаны, суды немесе майды салқындатудан тұрады. Болат бетінің қасиеттері жаңарту үшін қолданылатын басқа термиялық өңдеу процестері де бар, мысалы, азоттау, көміртектендіру, вакуумдық термиялық өңдеу, криогендік термиялық өңдеу, лазерлік термиялық өңдеу, иондық сәулелік термиялық өңдеу және т.б. [4]. Бұл процестердің барлығы қымбат конфигурацияны қажет етеді, өңдеу уақыты ұзағырақ, кейбір процестер экологиялық таза емес, ал кейбіреулері көлемді жабдықты қажет етеді .

Электролиттік плазмамен өңдеу - бұл барлық кемшіліктерді жоюдың жаңа әдісі. Бұл оның қажетті механикалық қасиеттерді сәтті жақсарту алатынын дәлелдейді. Сағат пен күнді қажет ететін дәстүрлі термиялық өңдеу процестерімен салыстырғанда уақыт әлдеқайда аз, шамамен бірнеше минут. Сонымен қатар, өте арзан жабдық қажет және процестің өзі экологиялық таза болып табылады.

Бұл процесс арқылы машина бөлшектерінің атмосфералық жағдайда қажалу мен тот басуға төзімділігін арттыру және өңдеу жағдайында өте үлкен градууста беріктілік қалпын сақтау өзекті мәселе. Осы себептен аз уақыт аралығында жоғары температурада болаттың беткі диффузиялық қабатының беріктілік қасиетін жоғарылату үшін осы тақырып таңдалынды.

Бұл шолудың мақсаты – өнеркәсіп саласында машина бөлшектері үшін беткі қабатын бормен, цементпен және азотпен толтыру әдісін электролиттік плазмалық ортада жүзеге асыру кезіндегі болаттың трибологиялық қасиеттерін зерттеу және оның қолдану аясын анықтау және проблемалар туындайтын аймақтарды зерттеу үшін плазмалық-электролиттік өңдеу деп аталатын жаңа термиялық өңдеу әдісінің әртүрлі аспектілерін зерттеу және назар аудару.

Осы тақырып бойынша шетелдік зерттеушілер орташа көміртекті болаттың тозуға төзімділігі мен коррозияға төзімділігіне плазмалық электролиттік азоттау, цементтеу, борлау және жылтыратудың технологиялық параметрлерінің әсерін қарастырған. Жалпы кез келген

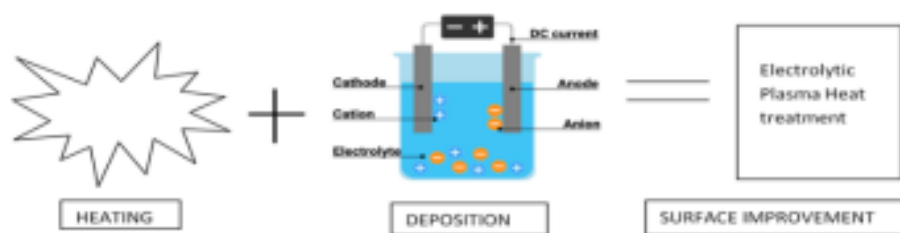
болаттарды цементтеу, азоттау, карбониттеу, борлау процесстерін жүргізу режимдері АҚШ, Қытай, Ұлыбритания, Жапония, Ресей, Беларусь және басқа елдердің зерттеулерімен анықталған[1-3].

Бұл электролиттік плазмалық процесс металды жоғары температурада қыздыру үшін плазма жасау үшін жоғары кернеуде жүзеге асырылатын электролиз процесі. Плазма мен электролиздің тіркесімі 1-суретте көрсетілгендей бетті термиялық өңдеу технологияларына жаңа үлес қосты.

Заттың үш күйі бар: қатты, сұйық және газ тәрізді. Сонымен қатар, газ күйінен тыс төртінші күй бар және ол плазма деп аталады. Егер жылу қолданылса сұйықтыққа айнала отырып, ол жоғары температурада буланып, сұйық күй газ күйіне өтеді. Бұл газ тәрізді зат одан әрі қызған кезде бос электрондар бөлшектерден бөлініп, бос электрондары бар оң иондар түзіледі. Бұл бос электрондар электр тогын өткізеді. Плазманың пайда болу фазасы өте қысқа уақыт ішінде жану разрядымен белгіленеді және бұл жарқыл металды 2000°C дейін қыздыруы мүмкін. Бұл жылу металдардың бетін өзгерту үшін қолданылады [5].

Болат бетін өзгерту үшін сыртқы байланыспен болат бетіне көміртегі немесе азот бөлшектерін қолдану қажет болуы мүмкін. Мұны электролиз арқылы жасауға болады, онда көміртегі немесе азот атомдары электродқа белгілі бір электролитке батырылған электродқа жоғары кернеу беру арқылы тұндырылады. Бұл электролит электр тогын өткізуде маңызды рөл атқарады. Плазма мен электролиздің комбинациясы бетті электролиттік плазмалық өңдеу деп аталатын бетті өңдеудің жаңа әдісін жүзеге асыру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Кәдімгі электролиз процесінде электродтарға берілетін кернеу электролиттік плазма әдісімен салыстырғанда айтарлықтай аз, оның кернеуі 200В-тан 400В-қа дейін болады. Дайындама катод немесе анод болуы мүмкін. Егер катод дайындама ретінде жұмыс істесе, онда бұл катодты плазмалық электролиттік термиялық өңдеу, ал егер анод үлгі ретінде жұмыс істесе, онда бұл анодты плазмалық электролиттік термиялық өңдеу процесі болады. Кәдімгі электролизге қарағанда электрлік потенциалды қолдану өте үлкен болғандықтан, электрод бетіндегі газдың бөліну тығыздығы өте жоғары, бұл электр разрядымен бірге электродтың айналасындағы үздіксіз газ қабығына әкеледі. Бұл электр разряды үлгіні бірнеше секунд ішінде қайта кристалдану температурасынан жоғары қарқынды қыздыруға жауап береді. Үлгі содан кейін қуат көзін өшіру арқылы сол электролитте сөндіруге болады. Өртүрлі зерттеу жұмыстары плазмалық-электролиттік термиялық өңдеуден кейін болат бетінің қасиеттері айтарлықтай жақсарғанын көрсетеді.

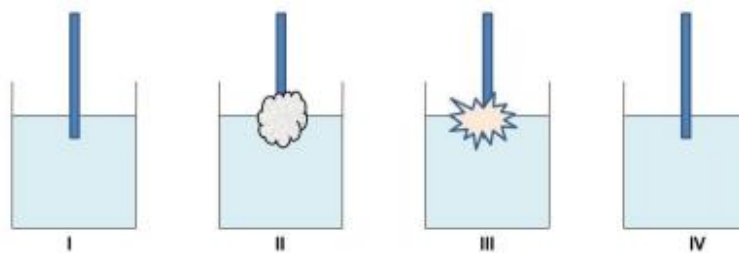


1-сурет – Электролит пен плазманың үйлесімінің материал бетінің қасиеттерін жақсартуы [6]

Қазіргі уақытта мамандар электролиттік-плазмалық тәсілмен қорғаныш жабындарын жоюдың бірегей технологиясын жасауға бағытталған зерттеулермен белсенді айналысады. Бұл технология Электрохимиялық өңдеудің жетілдірілген нұсқасы болып табылады. Электролит ретінде Бейорганикалық тұздар негізінде дайындалған улы емес ерітінділер қолданылады. Негізгі мазмұны электролит компоненті – 10%-дан аспайды. Өңдеу импульстік немесе тұрақты кернеудің (200-400В) әсерінен жүзеге асырылады, оның белгілі бір мәні материалдың маркасына байланысты таңдалады. Егер электролитке батырылған өңделетін

бөлік жоғары кернеуге ұшыраса, онда оның бетінде бу-газ қабаты пайда болады, ол бөліктің беті мен электролит арасындағы интерфейс қызметін атқарады. Бу-газ қабатының қалыңдығы ~ 50 мкм, сондықтан жоғары кернеудің әсері беттің микро шығыңқы жерлерінде импульстік микро разрядтардың пайда болуына әкеледі. Микроразрядтардың әсерінен қорғаныс жабыны ериді және бұзылады [7]. Электролитті-плазмалық өңдеу тұрақтылықтың әртүрлі деңгейімен сипатталады, көбінесе қалыптасқан бу-газ қабатының монолиттілігі мен тұрақтылығымен анықталады. Бұл сапа өз кезегінде электролитті электролиттің гидродинамикалық көрсеткіштері, жылу факторлары және басқа параметрлер молекулалық қасиеттеріне байланысты. Электролитті-плазмалық өңдеу технологиясы бетті одан әрі жабуға дайындауда белсенді қолданылады. Өңдеу процесінде беттің кедір-бұдырлығын екі есе азайтуға және материалға қажетті жылтыр беруге болады. Баламалы әдістермен салыстырғанда электролиттік-плазмалық өңдеудің белгілі бір артықшылықтары бар, олардың арасында өнімділіктің жоғарылауын, сондай-ақ өңделетін материалдың беткі қабатының құрылымының өзгеру белгілерінің болмауын атап өтуге болады. Сонымен қатар, өңдеуден кейін бетті алдын-ала майсыздандырусыз жабынды қайта жағуға болады [8].

Электролитті-плазмалық өңдеу процесін төрт негізгі фазаға бөлуге болады, олар өңделетін электродтың айналасында бу түзуден басталады. 2-суретте электролиттік плазма процесінің кезеңдері көрсетілген, онда қуат берілгеннен кейін температура көтеріле береді және плазма пайда болған кезде ең жоғары нүктеге жетеді. Плазма жарқырай бастағаннан кейін қуат көзі сөніп, электрод сол электролитте қатаяды.



2-сурет – Электролиттік плазмалық өңдеу кезеңдері: I) қоректендіруді қосу; II) будың пайда болуы; III) плазманың пайда болуы; IV) қатаю [6]

Катодты сөндіру мақсаттары үшін кернеу көзін өшіргеннен кейін сол электролитте салқындатуға болады, бұл сөндіру процесінің талабы. Үздіксіз плазмалық қабық фазасында электролиттердің бетіне көміртек пен азот атомдарын қолдануға болады.

Анодты беттік қабаттарды металл болып табылмайтын элементтермен (1-кестеде көрсетілген) қанықтыру әдетте жай ғана бейорганикалық тұздардың сулы ерітінділерімен, тиісті элементтері мен кейбір органикалық қосылыстары бар қажетті тұздармен жүзеге асырылады [8].

1-кесте – Электролит плазмалық өңдеу процестеріне арналған электролит құрамы

Процесс	Мақсаты	Электролит құрамы
Азоттау	Беттік қаттылықты, тозуға және коррозияға төзімділікті, шаршауға төзімділікті жақсарту	NaNO ₃ , 45%
Карбюрзация	Беттік қаттылықты, тозуға төзімділікті, шаршауға төзімділікті жақсарту	C ₃ H ₅ (OH) ₃ , 15%; Na ₂ CO ₃ , 5%

Байланыстыру	Беттік төзімділікті, ыстыққа төзімділікті және тозуға төзімділікті жақсарту	Na ₂ B ₄ O ₇ , 3%; NaOH, 45%
Карбюризация+азоттау	Беттік қаттылық пен тозуға төзімділікті жақсарту	C ₃ H ₅ (OH) ₃ , 15%; Na ₂ NO ₂ , 45%
Карбюризация+бормен қанықтыру	Беттік қаттылық пен тозуға төзімділікті жақсарту	Na ₂ B ₄ O ₇ , 3%; NaNO ₂ , 45%
Азоттау+бормен қанықтыру	Беттік қаттылық пен тозуға төзімділікті жақсарту	C ₃ H ₅ (OH) ₃ , 15%; Na ₂ B ₄ O ₇ , 3%; NaNO ₂ , 45%

Шойын негізіндегі тарату білігінің катодты-электролиттік плазмалық қатаюы жүргізілді және шойын негізіндегі автомобиль тарату білігінің қаттылығы 5 мм қаттылық тереңдігімен 60HRC дейін жоғарылағаны байқалды [9]. Қалыңдығы 20 мкм, қаттылығы шамамен 460HV болатын қабат 850°C температурада плазмалық-электролиттік азоттау арқылы титан қорытпасы жағдайында 5 минут ішінде ғана алынды [3]. 950HV ең жоғары микроқаттылыққа плазмалық электролиттік азоттау арқылы қол жеткізіледі, сонымен қатар бетінің кедір-бұдырлығы 4,5-тен 1,9 мкм-ге дейін төмендеді [10].

Плазмалық электролиттік жылтырату өңделмеген болатпен салыстырғанда беттің кедір-бұдырлығын 2 есе, азотталғанмен салыстырғанда 2,8 есе азайтуды қамтамасыз ететіні анықталған. Оңтайлы технологиялық параметрлерде аралас өңдеу өңделмеген болатпен салыстырғанда микроқаттылықтың 1130 HV дейін жоғарылауына, тозуға төзімділіктің 70 есе артуына және коррозия тығыздығының 3 есеге жуық төмендеуіне әкеледі [11]. Тағы бір шетелдік зерттеушілердің жұмысы бойынша Ce-Nd қорытпаларын 650°C температурада 25 сағат бойы диффузиялық жұптық сынаудың 72 сағаттық азотталған хром жабынының диффузиялық ауданы 17,500мкм² дейін байқалатын өңделмеген хром жабынынан айырмашылығы – көзге көрінетін өзара қатынасы бар диффузиясыз тамаша тосқауылдық қасиеттерге ие екенін көрсетті [12]. Орташа ток күші 2,6 А және электрон энергиясы 200 эВ бірдей үздіксіз және импульстік режимдерде түзілетін электронды сәуленің плазмасында 12X18H10T тот баспайтын болатты төмен температурада 400°C азоттау кезінде шыңдалған қабаттың түзілуі зерттелді. Импульс кезінде беттің қарқынды ионды шашырауына қарамастан, азоттаудың екі режимінде де қабат қалыңдығы мен қаттылығының бірдей мәндері алынды, бұл азоттау процесінде бейтарап атомдық азоттың басым рөлін көрсетеді [8].

Электролиттік плазма процесі тұрақты ток әдісімен және импульстік ток әдісімен зерттелді. AISI 1050 болатының беттік қатаюы үшін импульстік ток әдісі тұрақты ток әдісімен салыстырғанда аз кернеу мен уақытты қажет ететіні дәлелденді [13]. Карбонил темір ұнтағының коррозияға төзімділігі плазмалық электролиттік тұндыру арқылы карбонил бетіне SiO₂ қабатын қолдану арқылы жақсарды [14]. SS304 коррозиялық әрекеті де зерттелді, онда шар диірменінде ұнтақталған үлгілер алдымен күйдіріліп, содан кейін электролиттік плазмамен өңделді. Коррозияға төзімділік айтарлықтай жақсарғаны анықталды [15]. Магний қорытпасына оксидті жабынның тұндыру жылдамдығы импульстік поляризация режимінде электролиттік плазма процесін қолдану арқылы артады. Электролиттік плазма процесін қолдана отырып, дәйекті жабу және жылтырату мүмкін, бұл процесті динамикалық және көп функциялы етеді. Құрылымдық болат пен титан қорытпаларын борирлеу электролит-плазмалық процесті қолдану арқылы жүзеге асырылды. Құрылымдық болат және титан

қорытпасы жағдайында коррозияға төзімділік айтарлықтай жақсарды, сондай-ақ тозуға да төзімділік байқалды [16].

Отандық зерттеушілер электронды микроскопиялық зерттеулерді бағалау және өлшеулерді талдау арқылы беткі қатаю сәйкесінше 60% және 40% көлемдік үлестері бар пакеттік-пластиналық мартенситтің және тиісінше пакеттік-пластиналық мартенсит кристалдарындағы 5% және 7% үлестері бар қалдық аустенит түріндегі γ -фазаның, сондай-ақ фазалық Карбид бөлшектерінің, атап айтқанда 0,6 пластиналық мартенсит кристалдарындағы үлестері бар цементиттің пайда болуына әкелді, тиісінше 0,6% және 1,5%, және $M_{23}C_6$ кешенді карбиді, сәйкесінше 0,15% және 0,35% пакеттік-пластиналық мартенсит кристалдарындағы үлестері бар. Электролитті плазмалық қатайтудан кейінгі пакеттің және плиталық мартенситтің скалярлық тығыздығы (ρ) сәйкесінше $3,78 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ және $3,0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, бұл бастапқы күйден 1,5 есе жоғары; пакеттің және плиталық мартенситтің ұзақ әсер ететін ішкі кернеулерінің амплитудасы $\sigma_d = 285 \text{ МПа}$ және $\sigma_d = 270 \text{ МПа}$ құрайды. ал пакеттің ығысу кернеулерінің амплитудасы мен пластиналық мартенсит $\sigma_L = 390 \text{ МПа}$ және $\sigma_L = 345 \text{ МПа}$ мәндеріне ие, яғни $\sigma_L > \sigma_d$ шарты орындалады, бұл өз кезегінде иілудің, кристалл торының бұралуының пластикалық сипатын растайды[6]. Басқа да отандық зерттеушілердің еңбегі бойынша, модификацияланған бет құрылымын алу үшін $20\text{Cr}_2\text{Ni}_4\text{A}$ болатты плазмалық электролиттік цементтеу әдісін қолданып, беттік қатайту процесі 20% натрий карбонаты мен 20% сулы электролит ерітіндісінде жүргізілген. Үлгі ферритті-перлиттік құрылымнан тұрады, яғни бөлік өзінің тұтқыр өзегін сақтайды, ал беткі қабатында карбид бөлшектері болған. Қатайту процесі мартенситтің өзгеруін және беткі қабатта карбид бөлшектерін құруды тудыра отырып, беткі қабаттарда карбид бөлшектерінің болуы трибомеханикалық көрсеткіштерге оң әсер еткен. Ұзындығы 600 мкм шыңдалған құрылым 520 ВВ-қа дейін қаттылықты арттырып, тозуға төзімділігі 2,5 есе жоғары болатын көрсеткішке қол жеткізген [17].

Электролиттік плазмалық өңдеу болаттың тозуға төзімділігі мен коррозияға төзімділігін сәтті арттыра алатыны дәлелденді. Сонымен қатар, аспаптық болат жағдайында құралдың қызмет ету мерзімін ұзарту үшін қаттылықтың айтарлықтай тереңдігіне қол жеткізуге болады. Тәжірибенің бір қондырғысы қатайту, азоттау, карбонитрлеу, қаптау, жылтырату және тазалау сияқты бетті өңдеудің әртүрлі түрлерін орындай алады. Дегенмен, процесс болаттың, сондай-ақ алюминийдің әртүрлі түрлері үшін орындалса да, бүгінгі күнге дейін материал тұрғысынан стандартталған термиялық өңдеу циклі жоқ. Сонымен қатар, плазманың түзілуі лездік процесс болғандықтан және бірнеше секунд ішінде жүретіндіктен, біздің қажеттіліктерімізге сәйкес шығыс параметрлерін алу үшін процестің кіріс параметрлерін тұрақтандыру қиынға соғады. Қолданыстағы техникалық мәселелерге байланысты бұл процесс әлі де дамып келеді және криогеника және вакуумдық термиялық өңдеу сияқты басқа процестер сияқты бүкіл әлемде коммерцияланбаған.

Құрал-саймандар мен машина бөлшектерінің бетін қатайтатын термиялық өңдеу үшін технологиялық лазерден, электронды зеңбіректерден немесе жоғары жиіліктегі токтардан жылу қолданылады. Бірақ жабдықтың жоғары құны және материалдық-энергетикалық ресурстарды пайдаланудың төмен тиімділігі осы технологияларды қолдануды шектейді. Коррозиялық ортадағы компоненттердің тозуға төзімділігін плазмалық электролиз арқылы жақсартуға болады. Мысалы, Жақсы тозуға төзімділік құрамында гидрокөміртекті және фосфорлы қосылыстар бар ортада алынады. Мұнда оксид қабаттарының тозу механизмі металдың өзінен ерекшеленеді [18]. Металдардың механикалық және коррозиялық қасиеттерінің нашарлауы бір уақытта болуы мүмкін. Керісінше, оксид бетінде бұл процестер бөлек жүруі мүмкін. Тозу контртелмен жанасатын жерлерде болады, ал коррозия оксид қабатының тесіктерінде болады [19].

Борланған болаттар қатты темір боридтерінің түзілу есебінен түзілген цементтеумен немесе нитроцементтеуден салыстырғанда тозуға төзімділік бойынша өте жақсы көрсеткішке

ие болады. Сонымен қатар, бордың диффузиялық қанығуы қаттылықтың (800°C дейін), ыстыққа төзімділіктің ($900-950^{\circ}\text{C}$ дейін), сонымен қатар көміртекті болаттардың бейорганикалық қышқылдардың сұйылтылған сулы ерітінділерінде (атап айтқанда күкірт, тұз, азот және фосфор) коррозияға төзімділігі жоғарылауына ықпал етеді, Борлау әр түрлі ортада жүзеге асырылуы мүмкін. Дәстүрлі әдістерге ұнтақ қоспаларында (қатты борлау), электролизді, сұйық (электролизсіз) және газды борлау жатады [14-15]. Қатты фазадан бормен қанықтыру ферробор немесе аморфты бор және бор карбиді ұнтақтарында жүзеге асырылады. Еріткіштер ретінде кремний карбиді мен алюминий оксидін пайдаланады және активаторлар ретінде аммоний хлорид, натрий карбонаты, аммоний, калий немесе натрий фторобораттары қызмет етеді. Мысалы, 6 сағат ішінде 950°C температурада орташа көміртекті болат (0,45% C) қаттылықты 261РМ ден 1193РМ дейін арттыру арқылы Fe_2B боридінің пайда болуына әкеледі [20]. Электролиздік борлау Шығыс Еуропа елдерінде кең таралған, 0,2-0,25 А/см² ток тығыздығында катод ретінде қызмет ететін бор балқымаларында өткізіледі. Кері токты қолдану катодты және анодты импульстардың әртүрлі ұзақтығында ток тығыздығын 0,03–0,04 А/см² дейін төмендетуге мүмкіндік береді және пассивті тұнбаның пайда болуына жол бермеудің алдын алады.

Газбен борлау диборан немесе үш хлорлы бормен сутегі қоспасында жүзеге асырылады және оны төмен температурада жүргізуге болады. Әдістің кемшілігі-улылығы және газдардың жарылыс қаупі.

Соңғы жылдары жаңа борлау әдістері немесе қосымша дәстүрлі процестерге әсер ету ұсынылған. Ең алдымен, жану разрядында плазмалық борлауды атап өткен жөн. Бор хлориді, сутегі және аргон қоспаларында 550°C қыздыру және 1,7 МПА қысым кезінде армкотемірді өңдеу Fe_2B қабатының жақсы адгезиясымен және FeB қосылымдарын жоюмен микроқаттылықтың 2000 HV дейін жоғарылауына әкеледі. Электронды-сәулелік өңдеуден кейін борланған үлгілер оң нәтиже береді. $10^{-3}-10^{-5}$ Па қысым кезінде электрондардың сәулеленуі 940°C кезінде 3 сағат ішінде бор карбиді ұнтағында боризациядан кейін пайда болған кристалдық құрылымды модификацияны 10 с уақыт аралығында тудырады [21].

Қарастырылған әдістер, әдетте, балқымалар немесе газдарда, ұнтақтарда борлау кезінде бірнеше сағатқа созылатын технологиялық цикл айтарлықтай ұзақтығымен сипатталады. Жылдам, бірақ қымбат болатын электрондық әдістер – сәулелік немесе лазерлік жабынды өңдеу процесі жабу процедураларын қоса есептемегенде бірнеше минут ішінде орындалады. Соңғы жылдарда белгілі бір артықшылықтарға ие қорытпаларды және металдарды электролитпен плазмалық борлау әдісі сәтті дамуда. Бұл процесс бірнеше минут ғана уақытты алады және алдын ала дайындықты қажет етпейді, сонымен қатар оңай өңделетін бетті кейіннен улы заттарды қолданбай арзан жабдықтар арқылы электролизбен сол күйінде қатайтады.

Ұсынылған шолудағы нәтижелерді талдау дәстүрлі тәртіпте, яғни бір жағынан өңдеу шарттары мен әдістері мен алынған құрылымдар арасындағы байланысты анықтай отырып, екінші жағынан, содан кейін өзгертілетін металдар мен қорытпалардың қасиеттері талқыланады. Одан әрі қарай, электролитпен плазмалық борлау негізгі әдістері, атап айтқанда, қуат көздерінің түрлері, тандалған гидродинамикалық жағдайлар және процестің полярлығы қарастырылады және жіктеледі. Содан кейін алынған құрылымдар, олардың элементтік және фазалық құрамы, сондай-ақ бор мен басқа элементтермен қанықтырудың әртүрлі жағдайларындағы микроқаттылық талданады. Тозуға төзімділікке айтарлықтай әсер ететін беткі қабаттың маңызды трибологиялық қасиеттерінің бірі – қаттылық [22].

Электролиттік-плазмалық борлау әдістерін, осы жағдайларда басқа диффузиялық қанықтылық сияқты, әртүрлі белгілерге қарай жіктеуге болады. Ең алдымен, бұл қыздыру және қанықтыру бу-газ қабығы ортасының күйін анықтайтын өңделетін бөліктің полярлығы. Катодтық процестер жеткілікті ток тығыздығымен доғаға айналуы мүмкін жану түріндегі дамыған электр разрядтарымен сипатталады. Бұл бөліктің температурасын реттеуді

қиындатады, қызып кету және оның кедір-бұдырының жоғарылауымен бетінің сөзсіз эрозиясы оған қауіп төндіреді. Кез-келген полярлықта электролиттердің сулы ерітінділерінде өңдеу жүргізілсе, су буының едәуір мөлшері болады. Дегенмен тотығу дәрежесі катодты өңдеу кезінде бөліктің материалы айтарлықтай аз, мүмкін сутегінің болуы және оттегінің болмауы әсер береді.

Анодпен өңдеу кезінде бөліктің температурасы 1000-1100⁰С-ден аспайды, өйткені металл катодсыз доғалық разряд мүмкін емес, ал разрядтардың басқа түрлері маңызды рөл атқармайды. Бұл жағдайда бу газды қабық өткізгіштігі негізінен сулы ерітіндіден шығарылған электролит аниондарымен жүзеге асырылады. Анод бөлігінің бетіндегі электрохимиялық реакциялар маңызды рөл атқарады.

Қатайтылған қабаттардың тозуы

Борлау. Н13 болатының тозуға төзімділігі құрамында бор мен натрий гидроксиді бар ерітіндідегі электролиттік-плазмалық борлаудан кейін, өңдеу температурасы 900⁰С-ден 960⁰С-ге дейін жоғарылағанда айтарлықтай артады. Үлгілер сыналды абразивті тозу кремний карбидінің қарсы корпусы бар саусақ-диск схемасы бойынша қалыпты жүктеме 50Н, тұрақты айналу жылдамдығы 200 айн/мин [23]. Жаппай тозу өңделмеген үлгіге қарағанда 12 есе төмендеді. Тиісінше, бақылау үлгісінің үйкеліс жолындағы зақымданулар соңғысының бетінде нанокұрылымдық қабаттың пайда болуына байланысты боратталғанға қарағанда едәуір жоғары. Болаттан жасалған үлгілер бор қышқылы (5%) және аммоний хлориді (10%) ерітіндісінде бортқа алынды [24]. Сынақтар диаметрі 6,35 мм мойынтіректі болаттан жасалған шармен 5 Н жүктемеде және 9,4 м/с сырғанау жылдамдығында жүргізілді. Үйкеліс жолының радиусы 5 мм, үйкеліс жолы 240 м болды. «Литол» майлау сынақтарында контртеле 45 болаттан жасалған диск ретінде қызмет етті, 59 HRC дейін қатайтылды, 209 Н жүктеме және 0,49 сырғу жылдамдығы үйкеліс жолындағы 500м/с борланған үлгілердің үйкеліс коэффициенті майлаумен де, құрғақ үйкеліспен де бақылау үлгісіне қарағанда әрқашан төмен екенін көрсетеді [25]. Минималды үйкеліс коэффициенті 0,13-ке тең, электролиттік-плазмалық борлаудан борлаудан кейін 850⁰С температурада, қабаттағы микроқаттылық пен бор концентрациясының ең үлкен мәндеріне қол жеткізілген кезде байқалады. 900⁰С және 950⁰С өңдеу температураларында үйкеліс коэффициенттері беттің кедір-бұдырының жоғарылауына байланысты біршама артады [26].

Бороцементтеу. Глицерин борақс ерітіндісіндегі электролиттік-плазмалық өңдеу цементациядан кейінгі Q235 болат үлгілері 1-3 мкм жоғарғы қабатын алып тастай отырып, құрғақ үйкеліс сынақтарына дейін жылтыратылды [27]. Үлгілердің тозуы диаметрі 4,763 м болатын ZrO₂ керамикалық шарымен жүзеге асырылды, ол 5Н жүктеме мен бөлме температурасында 300 айн/мин жылдамдықпен айналды. Цементтелген үлгілер бюросының үйкеліс коэффициенті бақылау үлгісіне қарағанда тезірек тұрақтанады және электролиттік-плазмалық өңдеу цементация ұзақтығының жоғарылауымен төмендейді. Мұнда микроқаттылықпен корреляция бар. Микроқаттылық неғұрлым жоғары болса, контртелмен нақты жанасу аймағы соғұрлым төмен болады, бұл электролиттік-плазмалық өңдеу цементация ұзақтығының әсерін түсіндіреді [28]. Сонымен қатар, микроқаттылықтың жоғарылауы сынақтар кезінде үйкеліс коэффициентінің шамалы өзгеруімен процесті тұрақтандыруға ықпал етеді.

Жылыту мен салқындатудың балама әдісі.

AISI4140 электролиттік плазмалық термоциклді өңдеуден өткенде, материалдың көлденең қимасының стереомикроскопиялық көрінісі қатаю аймағын және әсер етпейтін аймақты анық көрсетті [29]. Бұл әдісте 300-320В жоғары кернеу бірнеше секундқа беріледі, содан кейін 230-250В төмен кернеу беріледі. Жоғары және төмен кернеуді кезектесіп қолдану қыздыру мен салқындатуға әкеледі, нәтижесінде қалыңдығы небәрі 42 секундта қатайтылған қабат пайда болады. Осылайша, өте қысқа уақыт ішінде процесс параметрлерін оңтайландыру арқылы жоғары қалыңдықты алуға болады. Өңделген үлгінің микроқұрылымы

электролиттік плазмалық сөндіру кезінде қыздыру және салқындату циклдеріне байланысты. Циклдердің аз болуы екі қабаттың пайда болуына әкеледі, атап айтқанда негізгі материалдағы күшейтілген аймақ және өтпелі аймақ [30]. Циклдердің көп болуы үш аймақтың пайда болуына әкеледі, атап айтқанда негізгі материалда балқу аймағы, қатаю аймағы және өтпелі аймақ. Қаттылық тереңдігі циклдар санының артуымен артады. Дегенмен, оңтайлы күй талабы бар.

Конструкциялық болат үлгілерін электролитті плазмалық азоттау катод режимінде 20% натрий карбонаты мен 10% карбамидтің электролитті сулы ерітіндісінде жүргізілді. Болатты азоттау температурасына дейін қыздыру үшін электродтар арасында 2с ішінде 320В кернеу берілді, содан кейін кернеу өшірілді, ал болат үлгісі жылу бетінен материалдың негізіне және ағып жатқан электролитке байланысты тез салқындатылды. Нәтижесінде өңделмеген болатпен салыстырғанда қалыңдығы 35мкм болатын жаңа қабат пайда болды, сонымен қатар микроқаттылықтың 1200 HV дейін жоғарылауына, тозуға төзімділіктің 75 есе, жылдамдығының 4,6 есе артуына және коррозия тығыздығының 2 есеге жуық төмендеді [31]. Бұл жердегі морттылық, сынғыштық – жылдам өңдеу кезінде металдың жарылып, сыну процесінің сипаттамасы. Бұл кемшілік болаттың қыздырылған күйде әртүрлі механикалық өзгерістерге төтеп беруіне, соғуға, дәнекерлеуге төзімділігін азайтады [32].

Тұндыру әдістері

Болат бетіне көміртек, азот, бор тұндыру электролиттік плазмалық термиялық өңдеу арқылы сәтті жүзеге асырылды. Q235 болатты өңдегеннен кейін электролиттік плазмалық карбонитрлеу кезінде 75 мкм ең үлкен қалыңдығы 750HV дейінгі қаттылық мәнімен небәрі 75 секундта алынғаны анықталды [33]. Уақыт пен қаттылық арасындағы байланыс зерттелгенде, жоғары уақыт кезінде қаттылық тереңдігі-жоғары қаттылық профилі аз өңдеу уақытының профиліне қарағанда кеңірек болғаны байқалды. 75с-тан асатын ұзақ өңдеу уақытында карбид қабаттың сапасы торлы үлгіге байланысты нашарлады [34]. Аспаптық болатты электролиттік плазмалық азоттау арқылы өңдеу кезінде максималды микроқаттылыққа коррозияға төзімділіктің жақсаруымен 1280HV кезінде қол жеткізілетіні анықталды [35].

Борлау. Құрамында бор бар ең көп таралған компонент-натрий тетрабораты (боракс), бірақ оның ерітінділерінің меншікті электр өткізгіштігі тиімді қанықтыру үшін әрдайым жеткіліксіз болады. Осы себепті катодты электролиттік плазмалық борлау үшін жұмыс істейтін электролиттер ереже бойынша, қосымша құрамында натрий гидроксиді бар. Төмен көміртекті және орташа көміртекті болаттарды өңдеу, оның ішінде төмен легирленген 4340, 4140, 1045, 3215 және 1020 (ASTM a29/A29M стандарты), кернеуі 600-ге байланысты 10-15 мин уақыт аралығында микроқаттылығы 900 HV-ден төмен емес қабат боратталған алуға мүмкіндік береді. Авторлар болатта хромның болуы бордың диффузиясына ықпал ететінін, ал көміртегі немесе никельдің алдын алатынын анықтады. 1600 HV максималды микроқаттылығы натрий гидроксиді жоқ 15% боракс бар сулы ерітіндіде 1020 төмен көміртекті болаттан алынады [36].

Бороцементтеу. Қалыңдығы 50 мкм 40X болатта (900°C, 5 мин), 120 мкм 40 болатта (900°C, 10 мин) және армко-темірде 40 мкм (850 мин/с, 5 мин) қатайтылған қабаттар құрамында 8% калий карбонаты, 41% глицерин бар ерітіндіде катодты өңдеуден кейін алынды. Q235 болатының катодты электролитті-плазмалық бороцементтеу процесі 290В глицеринмен боракс ерітіндісінің (15%) мысалында зерттелген [37].

Болатты азоттау – қаттылықты, тозуға төзімділікті және коррозияға төзімділікті арттыру үшін болат бөлшектерінің беткі қабатын азотпен толтыру әдісі болып табылады [38]. Сонымен қатар жоғары сапалы электролит-плазмалық азоттау үрдісі кезінде болаттың беткі қабаттарының сипаттамалары жақсырақ трибологиялық қасиеттерге ие болады, яғни үйкеліс коэффициенті төмендейді. Nb және V компоненттерін қосу ыстық соғылған болаттың микроқұрылымы мен механикалық қасиеттеріне және сәйкес қатайту

механизмдеріне әсері әртүрлі әдістермен зерттеледі, беткі қабатты тазартуды, дислокацияны шыңдауды, ерітіндіні қатайтуды және тұндыруды қамтиды [39].

Электролитті-плазмалық борозоттау және боронитроцементтеу. Бор, азот және көміртекті қанықтырудың әртүрлі нұсқалары Н13 болатты катодты өндеуде зерттелген [40]. Электролиттік-плазмалық нитроцементтеу карбамид ерітіндісінде, Электролитті-плазмалық борозоттау борак пен нитрит ерітіндісінде жүргізіледі. Барлық үлгілер 15 минут ішінде 900°C температурада қаныққан, содан кейін электролитте қатайтылған. Қалыңдығы 20 мкм нитроцементтелген қабат алынды, оның тұтастығы төмен және жарықтары бар болған.

Борозоттау және боронитроцементтеу. Н13 болатының тозуға төзімділігі оның әр түрлі электролиттердегі электролитті-плазмалық нитроцементтеу, борозоттау, бороцементтеу және боронитроцементтеуден кейін зерттелді [41]. Сынақтар SiC контртелімен «саусақ-диск» схемасы бойынша және бөлшектердің өлшемдері шамамен 4,5 мкм болатын абразивті-кварц құмын беру кезінде жүргізілді. Қалыпты жүктеме әрбір 500 м сайын жаппай тозуды өлшей отырып, үйкеліс жолында 200айн/мин үлгілердің айналу жылдамдығы 3500 м-ге дейін 50 Н құрады. Электролиттік-плазмалық азоттаудан кейінгі өңделген болаттың тереңдігі бойынша микроқаттылықтың өзгеруі көрсетілген. Болаттың микроқаттылық туралы деректер құрылымның қалыптасуын растады. Микроқаттылық болаттың бетіне жақын жерде айтарлықтай артады. Өтпелі аймақтың табиғаты қатайтылған қабаттан негізге тегіс ауысуды қамтиды, ал өтпелі аймақтың микроқаттылығы негізге қарағанда сәл аз, ал негіздің микроқаттылығы өзгермейді [42]. Трибологиялық қасиеттер дегеніміз тозу, үйкеліс және қажалу, тоттану, майлау туралы сипаттайтын қасиеттер, табиғи және жасанды жүйелерде өзара әрекеттесетін беттер мен басқа трибоэлементтер салыстырмалы қозғалыста қалай әрекет ететінін қамтиды. Трибологиялық сынақ нәтижелері плазма-электролиттік қатайту процесі арқылы анықталған беттің кедір-бұдырына байланысты үйкеліс коэффициентінің айырмашылығын көрсетеді [43].

Зерттеу жұмыстарының нәтижелері электролиз плазмасындағы металдар мен қорытпалардың диффузиялық қанығу мүмкіндіктері туралы түсініктерді айтарлықтай кеңейтті. Кейбір болаттар мен титан қорытпаларының қаттылығын, тозуға төзімділігін және коррозияға төзімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік беретін электролиттерді өндеу режимдері мен композициялары анықталды. Дегенмен модификацияланған беттің құрылымдық ерекшеліктерінің оның қасиеттерінің өзгеруімен байланысы мәселелері бірқатар аспектілер зерттелмеген. Белгілі композициялардың боридтік потенциалы сенімді түрде анықталмаған, сонымен қатар жұмыс электролиттеріндегі боракс немесе бор қышқылының көрсетілген концентрациясы жұмыс камерасының көлемі бойынша орташа мәндерді сипаттайды, мұнда ерітіндінің температурасы айтарлықтай ерекшеленеді. Осы себепті борид қабатының сенімді анықталған фазалық құрамы көп фазалы орта арқылы бордың диффузия процесін зерттеумен негізделмеген. Міндет болаттар мен қорытпалардың бор және басқа элементтермен көп компонентті қанығуы жағдайында күрделене түседі. Сондай-ақ бұл беткі қабат құрылымының оның үйкеліс сипаттамаларымен байланысына қатысты болғандықтан көптеген жағдайларда беттік қаттылық, кедір-бұдыр және үйкеліс коэффициенті арасында байланыс жоқ. Ақырында, өндеу сапасының жоғарылауы олардың кедір-бұдырын азайту немесе оксид қабатының бос бөлігін кетіру үшін өнімдерді қосымша жылтыратумен байланысты болуы мүмкін. Электролиттік тәжірибе назар аударарлық бөлшектің жекелеген бөліктерін плазмалық қатайту бүкіл беттің тозуға төзімділігін арттыру, ол борлау және басқа да қанықтыру түрлеріне таралуы мүмкін [44].

Авторлардың жұмыстары бойынша 12X18H10T аустенитті болаттың беткі модификацияланған қабатының механикалық қасиеттері мен коррозияға төзімділігін зерттеу болып табылады, плазмалық нитроцементтелген және электролитте азотталған, содан кейін қатайтылған. Зерттеу үшін 12X18H10T болаттан жасалған табақ прокатынан 30x30x5мм³ өлшемді пластиналық үлгілер жасалған. Электролиттік-плазмалық нитроцементтеу және

азоттау алдымен үлгіні 320В кернеуде және ток күші 20-25А температурада 700-900⁰С температурада қыздырып, 10-12 секундқа шыдаған. Үлгілерді қыздыру плазмалық ортада жүзеге асырылды, ал үлгілер ішінара электролитке 4-5 мм тереңдікке батырылған, содан кейін кернеу 170В дейін және ток күші 10-12А дейін төмендеді, 750-850⁰С температурада 5-7 минут ұсталды, содан кейін салқындатылған электролит ағынында қатайтылды. 12Х18Н10Т болатты жылдам азоттау және нитроцементтеу арқылы, содан кейін қатайту арқылы бастапқы күймен салыстырғанда беткі қабаттың микроқаттылығын 3 еседен астам арттыруға болатындығы анықталды. Электролит плазмасында өңдеуден кейін Болат үлгілерінің модификацияланған бетінің үйкеліс коэффициенті 5 есе азаяды, тозу жылдамдығы бастапқы күймен салыстырғанда 2 есе азаяды [45]. Нитроцементтеу мен азоттаудан кейін коррозия жылдамдығы төмендегені, карбидтер мен темір нитридтерінің ірі және ұсақ бөлшектерінің қосылуымен мартенситтің пайда болуына байланысты коррозияға төзімділігі артқаны анықталды.

Бұл жұмыста электролиттік-плазмалық карбонитрлеу мен азоттаудан кейін 12Х18Н10Т аустенитті Болаттың беткі модификацияланған қабатының фазалық құрылымын зерттеген. Карбонитрлеу және азоттау, содан кейін қатайту карбид пен нитрид фазаларын құрайтыны анықталды. Сондай-ақ, электролиттік плазмалық өңдеуден кейін 12Х18Н10Т болатының қаттылығы жоғары екендігі анықталды. Үлгілер бетінің микроқұрылымы мартенсит пен қалдық аустенитпен ұсынылған. 12Х18Н10Т болатты карбониттеудің және электролиттік-плазмалық тәсілмен азоттаудың оңтайлы режимдері анықталды. 12Х18Н10Т болатты электролиттік-плазмалық өңдеу кезінде 750-800⁰С температура шегінде азоттау арқылы 7 минут ішінде қалыңдығы 55-тен 60 мкм-ге дейін, 850-900⁰С температурада 65-тен 70 мкм-ге дейін нитроцементтеу арқылы беттік модификацияланған қабат түзілетіні анықталды. Электролитті-плазмалық азоттау мен нитроцементтеуден кейін Болаттың модификацияланған беткі қабаты азот пен көміртегімен байытылған. 12Х18Н10Т болатты жоғары жылдамдықпен азоттау және нитроцементтеу кезінде кейіннен қатайту кезінде бастапқы күймен салыстырғанда беткі қабаттың микроқаттылығының 3,2-3,8 есе максималды жоғарылауы анықталғаны анықталды [46].

12Х18Н10Т болаттың электролиттік плазмалық өңдеу кезінде 800-900⁰С температура жағдайында 3 минут ішінде қалыңдығы 30-дан 40 мкм-ге дейін, 850-950⁰С кезінде 5 минут ішінде 42-ден 55 мкм-ге дейін, ал 7 минут өңдеу кезінде қалыңдығы 49-65 мкм-ге дейін қабат түзілетіні анықталды. Көміртектелген модификацияланған қабатта көміртектің тереңдігі бойынша өзгермелі концентрациясы бар, ол бетінен үлгінің өзегіне дейін азаяды, бұл беттің қаттылығы мен беріктігін арттыруға көмектеседі. 3,5 және 7 минут ішінде 800-950⁰С температурада өңделген кезде Fe₃C бөлшектерінде әдетте дәндердің айналасында пайда болатын темір карбиді фазасы бар, осылайша астықтың өсуіне жол бермейді, сонымен қатар аустениттің негізгі фазасы γ -Fe және мартенсит α -Fe бар. Электролитті-плазмалық өңдеу уақыты мен температурасының артуы анықталды. Болат 12Х18Н10Т бастапқы болатпен салыстырғанда микроқаттылықты 2-2,5 есе және тозуға төзімділікті арттыруға көмектеседі [47].

Алынған нәтижелер металлтану ғылымының негізгі аспектілерін, яғни модификацияланған қабаттардың құрылымы мен фазалық құрамын, өңдеу режимдері мен электролит құрамын, өңделетін материалдардың микроқаттылығы мен бетінің кедір-бұдырлығын, трибологиялық және коррозиялық қасиеттерін қамтиды. Модификацияланған қабатта толтырудың перспективті әдістерінің бірі азотқа, цементке, борға негізделген жабындарды тұндыру үшін қолданылатын электронды-плазмалық өңдеу әдістері тиімді нәтижеге қол жеткізді. Оларды дамыту және жетілдіру, сондай-ақ беттік трибологиялық қасиеттерін басқару күрделілігі әртүрлі құрылымдарды азотқа, цементке, борға негізделген жабындарды толтыру кезінде физикалық-механикалық қасиеттерді өзгертуге мүмкіндік беретін ауқымды кеңейтті, мысалы, тұрақты және ауыспалы құрамды жабындар, қатты

заттар негізіндегі жабындар. Трибологиялық параметрлерді электролит-плазмалық азотпен өңдеу нәтижелерін өңделмеген болатпен салыстырғанда қалыңдығы 35мкм болатын жаңа қабат пайда болды, сонымен қатар микроқаттылықтың 1200 HV дейін жоғарылауына, тозуға төзімділіктің 75 есе, жылдамдығының 4,6 есе артуына және коррозия тығыздығының 2 есеге жуық төмендеді. Азотпен толтырылған қабат көптеген коррозиялық орталарға өте төзімді: ауада, суда, сұйылтылған және концентрлі қышқылдарда. Электролит-плазмалық өңдеу көмегімен жұмсақ болаттың ыстыққа төзімділігін 600⁰C дейін арттыру мүмкіндігі көрсетілген [48].

Өңдеудің әртүрлі саладағы болашағы

1. Пресс-құрал өндірісі.

Электролиттік плазмалық өңдеу аспаптық болаттардың әртүрлі түрлерінде айтарлықтай оң нәтижелер көрсетті. Пресс-құралдарды өндіруде тозуға төзімділік пен коррозияға төзімділік қажет және бұл қасиеттерге электролиттік плазма процесі арқылы қол жеткізуге болады. Көміртекті электролиттік плазмалық цементтеу арқылы төмен көміртекті болат бетіне сәтті тасымалданды, бұл қаттылықтың 700HV дейін жоғарылауына әкеледі, сонымен қатар анод процесі бетінің кедір-бұдырының төмендеуіне әкеледі [49]. Күрделі компоненттер үшін процесті өзгертуге болады, онда компоненттің кішкене бөлігінде ғана карбюризация қажет.

2. Биомедициналық имплантаттар.

Титан қорытпасы негізінен биомедициналық импланттарда қолданылады және көптеген зерттеушілер плазмалық электролиттік жабын мен жылтырату арқылы титан бетін модификациялауды сәтті жүзеге асырды. V22 титан қорытпасының беттік қасиеттері 460HV қаттылығымен және 20 мкм қатайтылған қабатымен плазмалық-электролиттік азоттау арқылы айтарлықтай жақсарды [50].

3. Автомобиль өнеркәсібі.

Шойын негізіндегі білік электролиттік плазмалық сәндіруден кейін 50-60HRC көрсетті. Тарату біліктері сияқты автомобиль компоненттерін қажетті қаттылық пен тозуға төзімділік беру үшін электролиттік-плазмалық процестермен өңдеуге болады.

Қара және түсті металдар электролиттік плазмалық беттік өңдеу арқылы өңделді. Болатқа назар аударылады, өйткені ол өңдеу өнеркәсібінің негізгі материалы болып табылады. Болаттың әртүрлі маркалары бетті өңдеудің әртүрлі түрлерінде оң нәтиже көрсетті, мысалы, карбюризация, азоттау, бор, қатайту, жабу, тазалау және жылтырату. Әрине, электролиттік-плазмалық диффузиялық қанығудың басқа да артықшылықтары – қанығу ұзақтығын бірнеше минутқа дейін қысқартатын жоғары өңдеу жылдамдығы, қанықтыруды қыздырусыз сәндірумен байланысты, электролитке немесе ағынды қыздыруға ішінара батыру арқылы жергілікті бетті өзгерту ыңғайлылығы, улы заттардың және қымбат жабдықтардың болмауы болып табылады.

Қорытынды

Қазіргі кезде электролиттік плазма технологиясы – төмен, орташа және жоғары көміртекті болаттардың беткі қасиеттерін жақсартудың жаңа әдісі болып табылады. Жабдықтың, машиналардың сенімді жұмысын қамтамасыз ететін коррозияға төзімді жабындарды жасау және оның коррозиядан жоғалтуын азайту әдістерін жетілдіру кезек күттірмейтін міндет болып табылады. Атап айтқанда, болатты әртүрлі қоспалармен легирлеуге, коррозиялық ортаның құрамын өзгертуге, бұйымдардың бетіне қорғаныс беткі жабындарын қаптауға негізделген әдістер тиімді. Әртүрлі материалдардан жабын қабатын жасауда оң нәтиже көрсетеді. Бұл процесс үшін қажет қондырғы үнемді және қоршаған ортаға қауіп төндірмейтіндігі анықталды. Тиімді физика механикалық қасиеттерге қол жеткізу үшін қажетті уақыт 60с-тан 5 минутқа дейін болады, бұл қазіргі беткі өңдеу технологияларымен салыстырғанда айтарлықтай аз. Электролиттік плазма технологиясы – бұл динамикалық процесс, яғни өңдеу, тұндыру, жабу, тазалау, жылтырату бір қондырғыда

аздаған өзгерістермен жүзеге асырылуы айқындалды. Ғылыми зерттеу жұмыстарынан алынған деректер бойынша белгілі болғандай, электролит-плазмалық өңдеу әсерінен пайда болған болаттардың беткі жаңа қабаттың коррозияға және тозуға төзімділігі артатындығы белгілі болды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Фетисов Г.П., Гарифуллин Ф.А. Материаловедение и технология металлов: учебник. – Москва: Изд-во Оникс, 2007. – 161 с.
2. Уильям Д., Дэвид Дж. Материаловедение: от технологии к применению (металлы, керамика, полимеры). – Санкт-Петербург: Изд-во Научные основы и технологии, 2011. – 894 с. ISBN 978–5–91703–022–7 ISBN 978–0–471–71046–2 (англ.)
3. 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. <https://doi.org/10.3103/S106837551705012X>
4. Luk S.F., Leung, T.P., Miu W.S., Pashby I. Heating performance of electrolytic heat-treatment in aqueous solution by pulse current. *Journal of Materials Processing Technology* 1997. – 63. – 833–838. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02734-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02734-3)
5. Belkin P.N., Yerokhin A., Kusmanov S.A. Plasma-Electrolytic nitriding of 0.3Cr–1Mn–1Si–Fe construction steel // *Metal*. – 2019. – № 989. – P. 1174–1180.
6. Vitthal R., Jumbad Arvind Chel, Updesh Verma, Geetanjali Kaushik Application of Electrolytic Plasma Process in Surface Improvement of Metals: A Review // 2020. – № 9. – P. 1249 – 1262. <https://doi.org/10.33263/LIANBS93.12491262>
7. Rakhadilov B., Satbayeva Z., Ramankulov S., Shektibayev N., Zhurerova L., Popova N., Uazyrkanov G., Sagdoldina Zh. Change of 0.34Cr–1Ni–Mo–Fe Steel Dislocation Structure in Plasma Electrolyte Hardening // *J. of Materials*. – 2020. – №14(8). – P. 1928. [<https://doi.org/10.3390/ma14081928>]
8. 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. – №4. – С. 273–344.
9. Dayanç A., Karaca B., Kumruoğlu L. The Cathodic Electrolytic Plasma Hardening of Steel and Cast Iron Based Automotive Camshafts. // *Acta Physica Polonica*. – 2017. – №131. – 374–379.
10. Kusmanov S., Zhirov A., Kusmanova I., Belkin, P. Aspects of anodic plasma electrolytic polishing of nitrided steel. *Surface Engineering* // 2019. – №35. – P. 507–511. <https://doi.org/10.1080/02670844.2017.1406574>
11. Rakhadilov B.K., Vladimir V.B., Satbayeva Z.A., Sagdoldina Zh.B., Pogrebnyak A.D. The cathodic electrolytic plasma hardening of the 20Cr2Ni4A chromium-nickel steel // *J. of Materials Research and Technology*. – 2020. – №9(4). – P. 6969–6976. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.020>
12. Rita C.C., Nilson C.C., Elidiane C.R. Role of the Plasma Activation Degree on Densification of Organosilicon Films // *Materials*. – 2020. – № 13(1). – P. 25. <https://doi.org/10.3390/ma13010025>
13. Yongfu Zhang, Aiming Bu, Yan Xiang, Yunjie Yang, Weiwei Chen, Huanwu Cheng, Lu Wang. Improving corrosion resistance of carbonyl iron powders by plasma electrolytic deposition, *Materials & Design*. – 2020. – Vol 188. – 108480, ISSN 0264-1275.
14. Klapkiv M.D., Chuchmarev O.S., Sydor P.Y., Posuvailo V.M. Thermodynamics of the interaction of aluminum, magnesium, and zirconium with components of an electrolytic plasma. *Materials Science*. – 2000. – №36. – 66–79. <https://doi.org/10.1007/BF02805119>

15. Luk S.F., Leung T.P., Miu W.S., Pashby I. Development of electrolytic heat-treatment in aqueous solution. *Journal of Materials Processing Technology*. – 1998. – № 84. – P. 189–192.
16. Ayday A., Durman M. Wear performance of ductile iron after electrolytic plasma hardening. *Metallic Materials*. – 2019. – №57. – 19–26. https://doi.org/10.4149/km_2019_1_19
17. Apelfeld A., Borisov A., Dyakov I., Suminov I., Tambovskiy I. Enhancement of medium-carbon steel corrosion and wear resistance by plasma electrolytic nitriding and polishing // *J. of metals*. – 2021. – №11. – P. 1599.
18. Yeo S., Min Lee C., Soo Yoon H., Hwan Kim J. Synthesis of plasma-nitrided Cr coatings on HT9 steel for advanced chemical barrier property in a nuclear cladding application // *J. of Applied Surface Science*. – 2022. – №579.
19. Гаврилов Н.В., Мамаев А.С., Чукин А.В. Азотирование нержавеющей стали в плазме импульсного электронного пучка // *Письма в журнал технической физики*. – 2016. – №9. – P. 416–422.
20. Яцюк И.В., Добрынин Д.А., Доронин О.Н., Павлова Т.В. Методы удаления жаростойких покрытий (обзор) // *Труды Виам*. – 2020. – №10. – С. 92.
21. Çelikkan H., Öztürk M.K., Aydin H., Aksu M.L. Boriding titanium alloys at lower temperatures using electrochemical methods. // *Thin Solid Films*. – 2007. – № 515. – P. 5348–5352.
22. Под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. Термическая обработка в машиностроении. Справочник. – М.: Машиностроение. – 1980. – P. 783.
23. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия. – 1985. – 424. – С. 2.
24. Kunst H., Haase B., Malloy J.C., Wittel K. et al. *Metals, Surface Treatment*. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2012, p. 782–783.
25. Taheri P., Dehghanian Ch., Aliofkhaezai M., Rouhaghdam A.S. Plasma Process. – Polym. // 2007. – С. 711–716.
26. Kilic A., Kartal G., Urgen M., Timur S. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2013, 49 (2), 80–86.
27. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б. и др. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. – М.: Техносфера. – 2011. – №2. – С. 512.
28. Wang B., Xue W.B., Wu J., Jin X.Y. // *J. Alloy Compd*. – 2013. – №578. – С.162–169.
29. Taheri P., Dehghanian Ch., Aliofkhaezai M., Rouhaghdam A.S. Plasma Process. – Polym. // 2007. – №4. – С.721–727.
30. Гуляев А.П. *Металлургия*. – Москва: Металл, 1977. – 6 том.
31. Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н., Ивченко А.П., Понарядов В.В., Рузимов Ш.М. *Металлофиз. новейшие технол.* – 2003. – №25. – С. 1329.
32. Никитин В.Н., Еретнов К.И., Артемьев А.В. *Электронная обработка материалов*. М., *Металлургия* – 1983. – №2. – 35.
33. Weijian Chen, Pengfei Gao, Wang Shuai, Xiaolong Zhao, Zhengzhi Zhao. Strengthening mechanisms of Nb and V microalloying high strength hot-stamped steel // *Materials Science and Engineering*. – 2020. – №797. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140115>
34. Ivanov S.V., Salmanov N.S., Salmanov M.N. *Met Sci Heat Treat*. – 2002. – №44. – 405–406.
35. Tavakoli H., Khoie S.M., Rasooli F., Marashi S.P.H. et al. Electrochemical and physical characteristics of the steel treated by plasma-electrolysis boronizing, // *Surf Coat Technol.* – 2015. – №276. – 529–533.
36. Kusmanov S.A., Tambovskiy I.V., Sevostyanova V.S., Savushkina S.V. et al. Anode plasma electrolytic boriding of medium carbon steel // *Surf Coat Technol.* – 2016. – №291. – 334–341.

37. Терентьев С.Д. ЭОМ. – 1982. – №2. – 83–84.
38. Wei X., Chen Z.G., Zhong J., Wang L. et al. J Alloy Compd. – 2017. – №717. – 31–40.
39. Савицкий Е.М., Поварова К.Б., Макаров П.В. Металловедение вольфрама. – М.: Металлургия, 1978. – 224 с.
40. 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. – №350. – 813–822. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.04.044>
41. Luk S.F., Leung T.P. Miu W.S., Pashby I. A study of the effect of average preset voltage on hardness during electrolytic surface-hardening in aqueous solution. // Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – №91. – P. 245–249. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00441-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00441-5)
42. Shen D.J., Wang Y.L., Nash P., Xing G.Z. A novel method of surface modification for steel by plasma electrolysis carbonitriding. // Materials Science and Engineering. – 2007. – №458. – P. 240–243. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.067>
43. Bartsch K., Leonhardt A. Surf Coat Technol. – 1999. – №116–119. – 386–390.
44. Чечулин Б.Б., Ушков С.С., Разуваева И.Н., Гольдфрайн В.Н. Титановые сплавы в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
45. Кусманов С.А., Тамбовский И.В., Наумов А.Р., Дьяков И.Г. и др. Анодная электролитно-плазменная бороцементация малоуглеродистой стали // Физикохимия поверхности и защита металлов. – 2017. – №53 (3). С. – 321–328.
46. Скаков М.К., Курбанбеков Ш.Р. Повышение механических свойств и коррозионностойкости нержавеющей стали с помощью плазменной обработки // V конференция «Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии». – Плес, Ивановская обл., Россия. – 2013 г.
47. Скаков М.К., Курбанбеков Ш.Р., Табиева Е.Е., Заманбекулы Е. Модификация поверхностных слоев нержавеющей сталей азотированием и нитроцементацией. – Томск. – 2013. – 147.
48. Sherzod Kurbanbekov, Mazhyn Skakov, Michail Scheffler, Azret Naltaev. Changes of Mechanical Properties of Steel 12Cr18Ni10Ti After Electrolytic-Plasma Cementation. – 2013. – №601. – P. 59–63. <https://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.601.59>
49. Béjar M.A., Henríquez R. Surface hardening of steel by plasma-electrolysis boronizing. // Materials & Design. – 2009. – №30. – 1726–1728. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.006>
50. Dyakov I.G., Burov S.V., Belkin P.N., Rozanov E.V., Zhukov S.A. Increasing wear and corrosion resistance of tool steel by anodic plasma electrolytic nitriding. // Surface and Coatings Technology. – 2019. – №362. – 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.107>

REFERENCES

1. Fetisov G.P., Garifullin F.A. Materialovedeniye i tekhnologiya metallov: uchebnik [Materials Science and Technology of Metals: textbook]. – Moscow: Oniks, 2007. – 161 s. [in Russian]
2. William D., David J. Materialovedeniye: ot tekhnologii k primeneniyu (metally, keramika, polimery) [Materials science: from technology to application (metals, ceramics, polymers)]. – St. Petersburg: Izd-vo Scientific foundations and technologies, 2011. – 599 s. [in Russian]
3. 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. <https://doi.org/10.3103/S106837551705012X> [in English]

4. Luk S.F., Leung T.P., Miu W.S., Pashby I. Heating performance of electrolytic heat-treatment in aqueous solution by pulse current. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 63, 833–838. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02734-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02734-3) [in English]
5. Belkin P.N., Yerokhin A., Kusmanov S.A. Plasma Electrolytic nitriding of 0.3Cr–1Mn–1Si–Fe construction steel: article. – *Metal*, 2019. – 989, 1174–1180. [in English]
6. Vitthal R., Jumbad Arvind Chel, Updesh Verma Geetanjali Kaushik Application of Electrolytic Plasma Process in Surface Improvement of Metals: A Review, 2020, 9, 1249 – 1262. <https://doi.org/10.33263/LIANBS93.12491262> [in English]
7. Rakhadilov B., Satbayeva Z., Ramankulov S., Shektibayev N., Zhurerova L., Popova N., Uazyrkhanov G., Sagdoldina Zh. Change of 0.34Cr–1Ni–Mo–Fe Steel Dislocation Structure in Plasma Electrolyte Hardening. *Materials*, 2020. – 8, 1928. [in Russian]
8. Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N., Boyko A.G., Zhadkevich M.L., Kalyskhanov M. K., Ruzimov Sh.M. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka i nanesenie pokrytij na metally i splavy [Electrolytic plasma treatment and coating on metals and alloys]. *Advances in metal physics*, 2005, 6, 4, 273–344 s. [in Russian]
9. Dayana A., Karaka B., Kumruoglu L. The Cathodic Electrolytic Plasma Hardening of Steel Andean Caste Based Automotive Camshafts. // *Acta Physica Polonica*, 2017, 131, 374 – 379. [in English]
10. Kusmanov S., Zhirov A., Kusmanova I., Belkin P. Aspects of anodic plasma electrolytic polishing of nitrided steel. *Surface Engineering*, 2019, 35, 507–511. <https://doi.org/10.1080/02670844.2017.1406574>
11. Rakhadilov B.K., Vladimir V.B., Satbayeva Z.A., Sagdoldina Zh.B., Pogrebnyak A.D. The cathodic electrolytic plasma hardening of the 20Cr2Ni4A chromium–nickel steel. *Materials Research and Technology*, 2020, 9 (4), 6969–6976. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.020>
12. Rita C.C., Nilson C.C., Elidiane C.R. Role of the Plasma Activation Degree on Densification of Organosilicon Films. *Materials*, 2020, 13 (1), 25. <https://doi.org/10.3390/ma13010025>
13. Yongfu Zhang, Aiming Bu, Yan Xiang, Yunjie Yang, Weiwei Chen, Huanwu Cheng, Lu Wang. Improving corrosion resistance of carbonyl iron powders by plasma electrolytic deposition. *Materials & Design*, 2020, 188, 108480, ISSN 0264–1275. [in English]
14. Klapkiv M.D., Chuchmarev O.S., Sydor P.Y., Posuvailo V.M. Thermodynamics of the interaction of aluminum, magnesium, and zirconium with components of an electrolytic plasma. *Materials Science*, 2000, 36, 66–79. <https://doi.org/10.1007/BF02805119>
15. Luk S.F., Leung T.P., Miu W.S., Pashby I. Development of electrolytic heat–treatment in aqueous solution. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 84, 189–192.
16. Ayday A., Durman M. Wear performance of ductile iron after electrolytic plasma hardening. *Metallic Materials* 2019, 57, 19–26. https://doi.org/10.4149/km_2019_1_19
17. Apelfeld A., Borisov A., Dyakov I., Suminov I., Tambovskiy I. Enhancement of medium–carbon steel corrosion and wear resistance by plasma electrolytic nitriding and polishing. *Metals*, 2021, 11, 1599. [in English]
18. Yeo S., Min Lee C., Soo Yoon H., Hwan Kim J. Synthesis of plasma–nitrided Cr coatings on HT9 steel for advanced chemical barrier property in a nuclear cladding application. *Applied Surface Science*, 2022, 579.
19. Gavrilov N.V., Mamaev A.S., Chukin A.V. Azotirovaniye nerzhaveyushchey stali v plazme impul'snogo elektronnoy puchka [Nitriding of stainless steel in pulsed electron beam plasma]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki. Letters to the Journal of Technical Physics*, 2016, 9, 416–422 s. [in Russian].
20. Yatsyuk I.V., Dobrynin D.A., Doronin O.N., Pavlova T.V. Methods of removing heat-resistant coverings (review). *Proceedings of Viam*, 2020, 10, 92.

21. Çelikkan H., Öztürk M.K., Aydın H., Aksu M.L. Boriding titanium alloys at lower temperatures using electrochemical methods. // *Thin Solid Films*. – 2007. – № 515. – P. 5348–5352.
22. Edited by Yu.M. Lakhtin, A.G. Rakhshadt. *Termicheskaya obrabotka v mashinostroenii* [Heat treatment in mechanical engineering]. Guide. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 783 s. [in Russian].
23. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.N. *Himiko-termicheskaya obrabotka metallov* [Chemical and thermal treatment of metals]. M.: Metallurgy, 1985, 424s. 2. [in Russian].
24. Kunst H., House B., Maloy J.C., Witte K. et al. *Metals, Surface Treatment*. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. WileyVCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2012, 782–783.
25. Taheri P., Dehghanian Ch., Aliofkhazraei M., Rouhaghdam A.S. Plasma Process. – Polym. // 2007. – C. 711–716.
26. Kilic A., Kartal G., Urgen M., Timur S. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2013, 49 (2), 80–86.
27. Suminov I.V., Belkin P.N., Epelfeld A.V., Lyudin V.B. et al. *Plazmenno–elektroliticheskoe modifitsirovanie poverhnosti metallov i splavov* [Plasma-electrolytic modeling of reliability of metals and alloys]. M.: Technosphere, 2011, 2, 512.
28. Wang B., Xue W.B., Wu J., Jin X.Y. *J. Alloy Compd*, 2013, 578, 162–169.
29. Taheri P., Dehghanian Ch., Aliofkhazraei M., Rouhaghdam A.S. *Plasma Process Polym*. 2007, 4, s. 721–727.
30. Gulyaev A.P. *Metallurgiya* / [Metallurgy]. – Moskva: Metall, 1977. – 6 tom. [in Russian]
31. Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N., Ivchenko A.P., Ponaryadov V.V., Ruzimov Sh.M. *Metallofiz. novejschie tehnologii* [Metallophys. new technologies]. 2003, 25, 1329. [in Russian].
32. Nikitin V.N., Yeretnov K.I., Artemyev A.V. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic processing of materials]. M., Metallurgiya – 1983, 2, 35. [in Russian].
33. Weijian Chen, Pengfei Gao, Wang Shuai, Xiaolong Zhao, Zhengzhi Zhao. Strengthening mechanisms of Nb and V microalloying high strength hot–stamped steel. *Materials Science and Engineering*, 2020. – 797. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140115>
34. Ivanov S.V., Salmanov N.S., Salmanov M.N. *Met Sci Heat Treat* 2002, 44, 405–406.
35. Tavakoli H., Khoie S.M., Rasooli F., Marashi S.P.H. et al. Electrochemical and physical characteristics of the steel treated by plasma-electrolysis boronizing, // *Surf Coat Technol.* – 2015. – №276. – 529–533.
36. Kusmanov S.A., Tambovskiy I.V., Sevostyanova V.S., Savushkina S.V. et al. Anode plasma electrolytic boriding of medium carbon steel // *Surf Coat Technol.* – 2016. – №291. – 334–341.
37. Terentyev S.D. *EOM*. 1982, 2, s. 83–84. [in Russian].
38. Wei X., Chen Z.G., Zhong J., Wang L. et al. *J Alloy Compd*, 2017, 717, 31–40.
39. Savitsky E.M., Povarova K.B., Makarov P.V. *Metallovedenie volframa* [Metallogogy of tungsten]. M.: Metallurgy, 1978 – 224 s. [in Russian]
40. 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, 350, 813–822. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.04.044>
41. Luk S.F., Leung T.P., Miu W.S., Pashby I. A study of the effect of average preset voltage on hardness during electrolytic surface–hardening in aqueous solution. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 91, 245–249. [https://doi.org/10.1016/S0924–0136\(98\)00441–5](https://doi.org/10.1016/S0924–0136(98)00441–5)
42. Shen D.J., Wang Y.L., Nash P., Xing G.Z. A novel method of surface modification for steel by plasma electrolysis carbonitriding. *Materials Science and Engineering*, 2007, 458, 240–243. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.067>

43. Bartsch K., Leonhardt A. Surf Coat Technol, 1999, 116–119, 386–390.
44. Chechulin B.B., Ushkov S.S., Razuvaeva I.N., Goldfine V.N. Titanovye splavy v mashinostroenii [Titanium alloys in mechanical engineering]. L.: Mechanical Engineering, – 1977 – 248 s. [in Russian].
45. Kusmanov S.A., Tambovsky I.V., Naumov A.R., Dyakov I.G. Anodnaya elektrolitno-plazmennaya borocementaciya malouglerodistoj stali [Anodized electrolytic-plasma borocementation of maloglerodist Stali] // Fizikohimiya poverhnosti i zashita metallov. – 2017– 53 (3), 321–328 s. [in Russian].
46. Skakov M.K., Kurbanbekov Sh.R. Povyshenie mehanicheskikh svojstv i korrozionnostojkosti nerzhaveyushej stali s pomoshyu plazmennoj obrabotki [Improving mechanical properties and corrosion resistance using plasma treatment]. // In the conference "Modern methods in theoretical and experimental electrochemistry" – Russia – 2013. [in Russian].
47. Skakov M.K., Kurbanbekov Sh., Tebieva E.E., Zamanbekuly E. Modifikaciya poverhnostnyh sloev nerzhaveyushih stalej azotirovaniem i nitrocementaciej [Modification of surface layers by stainless steel nitriding and nitrocementation]. Tomsk – 2013 – 147 s. [in Russian].
48. Sherzod Kurbanbekov, Mazhyn Skakov, Michail Scheffler, Azret Naltaev. Changes of Mechanical Properties of Steel 12Cr18Ni10Ti After Electrolytic-Plasma Cementation. – 2013. – №601. – P. 59–63. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.601.59>
49. Béjar M.A., Henríquez R. Surface hardening of steel by plasma–electrolysis boronizing. // Materials & Design. – 2009. – №30. – 1726–1728. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.006>
50. Dyakov I.G., Burov S.V., Belkin P.N., Rozanov E.V., Zhukov S.A. Increasing wear and corrosion resistance of tool steel by anodic plasma electrolytic nitriding. // Surface and Coatings Technology. – 2019. – №362. – 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.107>