

**Буйткенов Дастана Болатулының**  
6D060400 – «Физика» мамандығы бойынша философия докторы (PhD)  
дәрежесін алуға арналған диссертациясының  
**АНДАТПАСЫ**

**Импульсті-плазмалық өңдеуге дейінгі және одан кейінгі титан  
карбосилициді негізіндегі детонациялық жабындардың құрылымдық-  
фазалық күйлері мен қасиеттері**

Қазіргі уақытта болат өнімдерінің пайдалану сипаттамаларын жақсартуға мүмкіндік беретін арзан, бірақ жоғары тиімді беттік модификациялау және қорғаныс жабындарын қолдану технологиялары қажет. Диффузиялық процестердің заңдылықтарын білу және бүрку кезінде пайда болатын өзгерістердің кинетикасын зерттеу оларды өңдеудің оңтайлы әдістерін іздеудің тиімділігін едәуір арттырады. Қазіргі уақытта ең тиімдісі жоғары өнімділікпен, әмбебаптығымен және технологиялық параметрлерді басқарудың қарапайымдылығымен сипатталатын жоғары жылдамдықты бүрку технологияларын қолдану болып саналады. Сондай-ақ, материалдың құрылымдық-фазалық күйін өзгерту процесін ынталандыратын аралас технологияларды қолдана отырып, өнімдердің бетін өңдеу әдістері қарқынды дамып келеді, осылайша модификацияланған беткі қабатты немесе белгілі бір қасиеттері бар жабынды алады.

МАХ-фазаға негізделген композициялық жабындарды алу ( $M_{n+1}AC_n$  үштік карбидтері және  $M_{n+1}AN_n$  нитридтері, М – өтпелі металл, А – IIIA немесе IVA кіші тобының элементі) ерекше қызығушылық тудырады. МАХ-фазаларға деген қызығушылық (мысалы,  $Ti_3SiC_2$  титан карбосилициді) ондағы металл мен керамика қасиеттерінің ерекше үйлесімімен түсіндіріледі: керамика ретінде ол қатты, жеңіл, беріктігі жоғары және тозуға төзімді, жоғары балқу температурасына ие, ал металл ретінде оңай өңделеді. Ең жаңа композициялық материалдардың қатарына  $Ti_3SiC_2$  формуласына сәйкес келетін карбидтер мен силицидтер болып табылатын МАХ деп аталатын қосылыстар тобы жатады. Кристалдық тордың құрылымдық ерекшеліктеріне байланысты  $Ti_3SiC_2$  физика-химиялық-механикалық қасиеттердің ерекше үйлесімімен сипатталады. Сондай-ақ, Ti-Si-C жүйелері абразивті тозу, коррозия жағдайында жақсы сипаттамаларға ие, сонымен қатар салыстырмалы түрде арзан. Жоғары тозуға төзімділік пен коррозияға төзімділіктің үйлесімі бұл материалды тозуға төзімді жабын ретінде пайдалануға мүмкіндік береді. Алайда, практикалық тұрғыдан пайдалы қасиеттердің бірегейлігіне қарамастан, жаппай материалдар да,  $Ti_3SiC_2$  жабындары да өндірісте кең қолданыс таппады.  $Ti_3SiC_2$  жабынын кеңінен қолдануға кедергі келтіретін факторлардың бірі-оны жабынның жоғары температурасында МАХ фазаларының ыдырауына байланысты бір фазалы өнім ретінде алу қиындығы.  $Ti_3SiC_2$  негізіндегі жабындарды газотремикалық әдістермен алу әдетте Ti-C және Ti-Si фазаларының пайда болуымен бірге жүреді. Салыстырмалы түрде көп мөлшерде  $Ti_3SiC_2$  бар жабындарды алу газотермиялық бүркудің кейбір әдістерімен, атап айтқанда, ұнтақты

материалдың шашыратылған бөлшектерін жеделдету және жылыту үшін газ жарылысын қолдану арқылы жүзеге асырылатын детонациялық бүрку кезінде мүмкін болады. Детонациялық бүрку кезінде ұнтақ материалы ериді және соққы толқынының әсерінен жоғары жылдамдықпен субстратқа оның бетінде жабын түзеді. Детонациялық жабындардың құрылымдық-фазалық күйлерінің қалыптасуы тозаңданудың технологиялық режиміне байланысты болғандықтан, оңтайлы бүрку режимдерін таңдау арқылы  $Ti_3SiC_2$  фазасының көлемдік үлесін көбейтуге болады.  $Ti_3SiC_2$  фазасының көлемдік үлесінің артуы композиттердің жоғары механикалық және трибологиялық қасиеттерін қамтамасыз етеді.

$Ti_3SiC_2$  үлесін көлемді немесе беттік термиялық өндеуді қолдану арқылы белгілі бір дәрежеде арттыруға болады. Алайда, көлемді термиялық өндеудің субстрат материалын ыдыратумен байланысты кемшіліктері бар, сонымен қатар көлемді термиялық өндеуді қолдану экономикалық тұрғыдан мүмкін емес. Сондықтан, біздің ойымызша, шоғырланған энергия ағындарымен беттік термиялық өндеу әдістерін қолданған жөн. Шоғырланған энергия ағындарымен беттік өндеуді лазер сәулесін, электронды сәулені, плазмалық ағынды және т. б. қолдану арқылы жүзеге асыруға болады. Олардың ішінде плазмалық қыздыру көзі, атап айтқанда импульсті плазмалық өндеу ерекше қызығушылық тудырады.

Осылайша, жоғары трибологиялық сипаттамалары бар бір фазалы  $Ti_3SiC_2$  жабындарын алудың перспективалық бағыттарының бірі  $Ti_3SiC_2$  ұнтағын детонациялық бүркуді және кейіннен импульстік-плазмалық өндеуді қамтитын аралас әдісті қолдану болып табылады. Сондықтан детонациялық бүркудің технологиялық режиміне байланысты титан карбосилицидіне негізделген жабындардың құрылымы мен қасиеттерінің қалыптасу заңдылықтарын зерттеу және титан карбосилицидіне негізделген жабындардың фазалық түрленуіне қыздырудың әсерін зерттеу, сондай-ақ импульстік плазмалық өндеу режимінің құрылымдық фазалық күйлерге және титан карбосилицидіне негізделген жабындардың қасиеттеріне әсерін зерттеу қажет.

Әдеби дереккөздерде детонациялық бүркудің технологиялық режиміне байланысты титан карбосилицидіне негізделген жабындардың құрылымы мен қасиеттерін қалыптастыру туралы жалпы пікір жоқ. Сондай-ақ, әдебиетте импульстік плазмалық өндеудің Ti-Si-C негізіндегі детонациялық жабындардағы құрылымдық және фазалық түрлендірулерге әсері туралы мәліметтер жоқ. Сонымен қатар, титан карбосилициді негізіндегі жабындардың трибологиялық сипаттамалары жеткілікті зерттелген жоқ.

Сондықтан детонациялық бүркудің технологиялық режиміне және кейінгі термиялық және импульстік-плазмалық өндеуге байланысты титан карбосилициді негізіндегі жабындардың құрылымдық-фазалық күйлерінің және трибологиялық қасиеттерінің қалыптасу заңдылықтарын зерттеу өзекті болып көрінеді.

**Жұмыстың мақсаты** детонациялық бүрку және кейінгі термиялық және импульсті-плазмалық өндеу кезінде титан карбосилициді негізіндегі

жабындардың құрылымдық-фазалық күйін және қасиеттерін қалыптастыру ерекшеліктерін зерттеу болып табылады.

Жұмыста қойылған мақсатқа жету үшін келесі **міндеттерді** шешу қажет:

– детонациялық бүрку параметрлерінің (оқпанды ацетилен-оттегі қоспасымен толтыру коэффициенті мен дәрежесі, бүрку қашықтығы) титан карбосилициді негізіндегі жабындардың құрылымдық-фазалық жай-күйін және механикалық-трибологиялық қасиеттерін қалыптастыруға әсерін анықтау;

– термиялық өңдеу кезінде титан карбосилицидіне негізделген детонациялық жабындардың фазалық түзілу процесін зерттеу;

– импульстік-плазмалық өңдеу кезінде титан карбосилициді негізінде детонациялық жабындардың беткі қабаттарының құрылымдық-фазалық жағдайының ерекшеліктерін зерттеу;

– кейіннен импульстік-плазмалық өңдеу арқылы детонациялық бүрку әдісімен алынған карбосилицидті жабындарды қолдану тиімділігін талдау және тозуға төзімділігін бағалау.

### **Қорғауға шығарылатын негізгі ережелер:**

1. Детонациялық бүркудің технологиялық параметрлеріне байланысты титан карбосилициді негізінде жабындардың құрылымдық-фазалық құрамын және қасиеттерін қалыптастыру. Детонациялық бүрку кезінде титан карбосилициді негізіндегі жабындарды алу мынадай параметрлермен: оттегі-ацетилен жарылғыш қоспасының көлемі 60% кезінде  $O_2/C_2H_2=1,856$  қатынасымен, бүрку қашықтығы 50 мм,  $Ti_3SiC_2$  фазасының ең аз ыдырауына байланысты жоғары қаттылықты ( $\sim 1000HV$ ) және тозуға төзімділікті қамтамасыз етеді (фазалардың құрамы 39 салмақ. %). Жарылғыш газ қоспасымен детонациялық оқпанды толтыру көлемі 70%-ға дейін ұлғайған кезде жоғары температуралы соққы толқынының салдарынан  $Ti_3SiC_2$  (MAX-фаза) ыдырауы және жабындар құрамындағы оның көлемдік үлесі 29 салмақ. % дейін азаяды.

2. Қыздыру температурасына байланысты титан карбосилициді негізінде детонациялық жабындардың құрылымы мен қасиеттерінің өзгеруі. 700-900 °С температурада 1 сағат бойы термиялық өңдеу нәтижесінде титан карбосилициді негізіндегі жабындарда MAX-фазаның ( $Ti_3SiC_2$ ) көлемдік үлесінің шамалы ұлғаюымен құрылымдық-фазалық түрленуі және жабындардың микроқұрылымының тегістелуі байқалады. 1 сағат ішінде 800 °С температурада термиялық өңдеу жабындардың микро қаттылығының және тозуға төзімділігінің шамамен 2,0-2,5 есе артуына әкеледі.

3. Импульстік плазмалық өңдеу кезінде титан карбосилициді негізіндегі детонациялық жабындардың құрылымдық-фазалық өзгерістерінің ерекшеліктері. Импульстік-плазмалық өңдеуден кейін келесі режимдерде: электрод W, жиілігі 1,2 Гц, өту жылдамдығы 5 мм/сек, өту саны 1, өңдеу қашықтығы 50 мм, детонациялық жабындар құрамындағы MAX-фазаның құрамы шамамен 1,7 есе артады. Импульстік плазма ағындарымен жабындарды өңдеу қалыңдығы 20 мкм дейін модификацияланған қабатты қалыптастыруға мүмкіндік береді. Карбосилицидті жабындардың беткі

кабаттарының құрылымдық-фазалық күйін өзгерту олардың механикалық сипаттамаларының өзгеруіне әкеледі: бетінің микроқаттылығын 1,8 есеге дейін арттыру, құрғақ үйкеліс коэффициентін 1,5-2,0 есе азайту және үлгілердің тозуға төзімділігін арттыру.

**Зерттеу нысаны** – импульсті-плазмалық өңдеуге дейін және кейін титан карбосилициді негізіндегі детонациялық жабындар.

**Зерттеу пәні** – импульстік-плазмалық өңдеуге дейін және одан кейін детонациялық жабындарда болатын құрылымдық-фазалық түрленулер және олардың жабындардың қасиеттерімен өзара байланысы (қаттылық, адгезиялық беріктік және тозуға төзімділік).

**Зерттеу әдістері.** Титан карбосилицидіне негізделген детонациялық жабындардың құрылымдық-фазалық жағдайларын зерттеу үшін эксперименттік зерттеудің келесі әдістері қолданылды: рентгендік құрылымдық талдау, сканерлейтін электронды микроскопия, жарық өткізгіш электронды микроскопия, электронды Ожэ-спектроскопия, профильметрия. Жабындардың механикалық сипаттамалары скретч-тестілеу әдісімен (сызат әдісі) және микроқаттылықты өлшеу арқылы сондай-ақ наноинденттеу әдісімен үлгінің көлденең қимасындағы жабындардың қаттылығы мен серпімділік модулін өлшеу арқылы анықталды. Жабындардың трибологиялық қасиеттері «шар-дик» схемасы бойынша үйкелетін беттердің үйкеліс және тозу коэффициентін өлшеу, сондай-ақ абразивтік және соққы-абразивтік тозу сынақтарымен анықталды.

Жұмысты орындау барысында Сәрсен Аманжолов атындағы ШҚУ КЕАҚ «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының және Ұжымдық пайдаланудағы Ұлттық ғылыми зертханасының, Академик Е. А. Бөкетов атындағы Қарағанды университетінің зертханасының, «PlasmaScience» ЖШС ғылыми-өндірістік фирмасының, Вроцлав ғылым және технологиялар университетінің (Вроцлав қ., Польша), «Томск ұлттық зерттеу политехникалық университетінің» Материалдардың қасиеттерін өлшеу орталығының (Томск, Ресей), Украина ҰҒА Е.О. Патон атындағы электр дәнекерлеу институты (Киев қ., Украина) зертханасының ресурстары мен жабдықтарын пайдаланды.

#### **Жұмыстың ғылыми жаңалығы:**

– онда алғаш рет МАХ-фазалардың төмен ыдырауын қамтамасыз ететін титан карбосилициді ( $Ti_3SiC_2$ ) негізіндегі жабындарды алу үшін детонациялық бүркүді қолдану мүмкіндіктері қарастырылды. Детонациялық бүрку режимінің негізгі параметрлерінің жабындардың құрылымдық-фазалық күйлеріне және қасиеттеріне әсерін бағалау негізінде жабындарды бүркүдің ұтымды режиміне негізделген таңдау жасалды;

– алғаш рет импульсті плазмалық өңдеудің құрылымдық-фазалық күйлеріне және детонациялық карбосилицидті жабындардың қасиеттеріне (қаттылығы мен тозуға төзімділігі) әсері зерттелді. Алынған мәліметтер негізінде детонациялық бүркүді және импульстік-плазмалық әсермен кейінгі өңдеуді қамтитын тозуға төзімді жабын алудың жаңа біріктірілген тәсілі әзірленді және оны жабындардың беткі қабаттарының механикалық-

трибологиялық сипаттамаларын қосымша арттыру үшін соңғы өңдеу ретінде қолдану ұсынылды. Әзірленген әдіс «Тозуға төзімді жабынды алу әдісі» пайдалы модельге патентпен қорғалған (№6659 жарияланған 12.11.2021 ж.).

**Практикалық маңыздылығы.** Импульстік-плазмалық өңдеуді қолдана отырып, титан карбосилициді негізіндегі детонациялық жабындардың тозуға төзімділігін арттырудың тиімді жолдары ұсынылған. Алынған нәтижелер болат бөліктерінің, атап айтқанда тозу және үйкеліс жағдайында жұмыс істейтін топырақ өңдеу машиналарының бөліктерінің қызмет ету мерзімін жақсарту үшін тозуға төзімді МАХ-фазалық жабындарды алу технологиясын жетілдіруде қолданыла алады.

**Жұмыстың ғылыми-зерттеу жобаларымен байланысы.** «Импульстік-плазмалық өңдеуге дейінгі және одан кейінгі титан карбосилициді негізіндегі детонациялық жабындардың құрылымдық-фазалық күйлері мен қасиеттері» тақырыбындағы диссертациялық жұмыс «Энергетика және машина жасау» ғылымын дамытудың басым бағытына сәйкес келеді және ҚР БҒМ Ғылым комитеті қаржыландыратын келесі жобаларға сәйкес орындалды:

– BR05236748 «Машина жасау бұйымдарына арналған тозуға төзімді материалдар алудың инновациялық технологияларын зерттеу және әзірлеу», 2018-2020 жылдарға арналған бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру, 16.03.2018 ж. №197 шарт.;

– AP08957719 «Топырақ өңдеу машиналарының жұмыс бөлшектерін нығайту және қалпына келтіру тәсілін әзірлеу», 2020-2021 жылдарға гранттық қаржыландыру, 12.11.2020 ж. №223 шарт.

**Автордың жеке үлесі.** Автордың жеке үлесі - эксперимент жүргізуге қатысу, диссертацияда баяндалған нәтижелерді алу, алынған нәтижелерді қорытындылау және талдау, диссертация тақырыбы бойынша ғылыми мақалалар жазу. Диссертациялық жұмыстың негізгі тұжырымдары мен ережелерін тұжырымдау ғылыми кеңесшілермен бірлесіп жүргізілді.

**Нәтижелердің негізділігі мен дұрыстығы дәрежесі** құрылымды, химиялық және фазалық құрамды, бет профилін, механикалық және трибологиялық сынақтарды, стандартты сынақ әдістерін, эксперименттік деректердің үлкен көлемін және қайталануын зерттеудің заманауи әдістерін қолданумен қамтамасыз етіледі. Диссертациялық жұмыста жүргізілген зерттеу нәтижелері белгілі ғылыми идеялар мен нәтижелерге қайшы келмейді.

**Жұмыс нәтижелерін апробациялау.** Негізгі нәтижелер: «Ұнтақты металлургия: беттік инженерия, жаңа ұнтақты композициялық материалдар. Дәнекерлеу» 11-ші халықаралық симпозиумында Минск қ., Белоруссия, 10-12 сәуір 2019 ж.; 2019 жылғы 10-13 қыркүйек аралығында «XXXVIIIth Autumn Tribology School 2019» Халықаралық ғылыми-практикалық конференциясында; XIII International Scientific and Practical Conference «International Trends in Science and Technology», Warsaw, Poland, 25 May, 2019; «Лазерлік, плазмалық зерттеулер және технологиялар - ЛаПлаз-2020» VI Халықаралық конференциясы 11-14 ақпан 2020 ж.; «Ұнтақты металлургия: беттік инженерия, жаңа ұнтақты композициялық материалдар. Дәнекерлеу»

14-ші халықаралық симпозиумында Минск қ., Белоруссия, 9-11 қыркүйек 2020 ж.; IEEE 10th International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties” (NAP-2020) Sumy, Ukraine, 9-13 November 2020.; IEEE 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2021) 5-11 September 2021; «Физикалық мезомеханика. Көп деңгейлі иерархиялық ұйымдасқан құрылымы бар материалдар және ақылды өндіріс технологиялары» Томск, 2021 ж. Халықаралық конференциясында баяндалды. Сонымен қатар, Негізгі ғылыми нәтижелер Сәрсен Аманжолов атындағы ШҚУ «физика және технология» кафедрасы мен «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының ғылыми семинарларында баяндалып, талқыланды.

**Жарияланымдар.** Диссертация тақырыбы бойынша 19 жұмыс, оның ішінде Web of Science және Scopus деректер базасында индекстелетін рецензияланатын ғылыми басылымдарда 5 мақала, ҚР БҒМ Білім және ғылым саласындағы сапаны қамтамасыз ету Комитеті ұсынған журналдарда 4 мақала, республикалық және халықаралық конференция материалдарында 9 жұмыс, сондай-ақ Қазақстан Республикасының пайдалы моделіне 1 патент жарияланды.

**Диссертацияның құрылымы мен көлемі.** Диссертациялық жұмыс кіріспеден, бес тараудан, қорытындыдан, 224 пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және 2 қосымшадан тұрады. Диссертацияның жалпы көлемі 113 бет, оның ішінде 64 сурет және 16 кесте.