

У.А. ЖОРАШЕВА¹, Ш.Р. КУРБАНБЕКОВ²

¹Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінің магистранты,
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: uyrinso96@mail.ru

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

²«Инновациялық технологиялар және жаңа материалдар институты» ЖШС

ҰШҚЫН ПЛАЗМАЛЫҚ ПІСІРУДІҢ ТІ-АЛ-НВ НЕГІЗІНДЕГІ ИНТЕРМЕТАЛЛИДТЕРДІҢ МИКРОҚҰРЫЛЫМЫНА ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. Бұл мақалада интерметаллидті материалдар алу мәселесі бойынша отандық және шетелдік зерттеулердің аналитикалық шолуының нәтижелері келтірілген. Әр түрлі типтегі интерметаллидті ұнтақ қоспаларының қысқаша сипаттамасы, құрылымы және олардың физика-механикалық қасиеттері, интерметаллидтерді алу әдістері туралы жалпы мәліметтер ұсынылған. Сонымен қатар, соңғы кезде кеңінен қолданысқа енген ұшқын плазмасының пісіру әдісіне кеңінен сараптама жасалынған. Ұшқын плазмалық пісіру әдісі арқылы алынған материалдардың элементтік және фазалық құрамы, олардың дисперсті прекурсорлардың алынған тереңдігі бойынша өзгеруі зерттелді. Сондай-ақ, ұшқын плазмалық пісіру әдісі және өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез әдісі арқылы алынған дайындамалар қарастырылған. Диффузиялық жұп әдісі және бағытталған кристалдану әдісі талқыланды. Ұшқын плазмалық пісіру технологиясын қолдана отырып, алынған интерметаллиттер қалыптастыру мәселелеріне ерекше назар аударылды, ұшқын плазмалық өңдеудің болашағы туралы тұжырым жасалды. Титан негізіндегі үштік жүйесінің фазалық тепе-теңдігінің сипаттамасы, тиісті қорытпалардың фазалық құрамы және олардың құрылымы қарастырылды.

Кілт сөздер: интерметаллид, микроқұрылым, ұшқын плазмалық пісіру, физика-механикалық қасиеттері.

U.A. Zhorasheva¹, Sh.R. Kurbanbekov²

¹Master's Student of Khoja Akhmet Yassawi the International Kazakh-Turkish University
(Kazakhstan, Turkestan), e-mail: uyrinso96@mail.ru

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

²«Institute of innovative technologies and new materials» LLP

Studies of the microstructure of intermetallides based on Ti-Al-Nb, after spark plasma sintering

Abstract. This article presents the results of an analytical review of domestic and foreign studies on the problem of obtaining intermetallic materials. Brief characteristics of powder mixtures of intermetallides of various types, general information about the structure and their physical and mechanical properties, methods for obtaining intermetallides are presented. There was also an extensive examination of the spark plasma sintering method, which has recently become widespread. The elemental and phase composition of materials obtained by spark-plasma sintering and their change in the obtained depths of dispersed precursors are investigated. The workpieces obtained by spark plasma welding and by self-propagating high-temperature synthesis are also

considered. The diffusion pair method and the directed crystallization method were discussed. Particular attention was paid to the formation of the obtained intermetallics using spark plasma sintering technology, conclusions were drawn about the prospects of spark plasma treatment. The characteristics of the phase equilibrium of a triple system based on titanium, the phase composition of the corresponding alloys and their structures are considered.

Keywords: intermetallic, microstructure, spark plasma welding, physico-mechanical properties.

У.А. Жорашева¹, Ш.Р. Курбанбеков²

¹*Магистрант Международного казахско-турецкого университета имени Ходжи Ахмеда Ясауи (Казахстан, г. Туркестан), e-mail: uyrinso96@mail.ru*

²*PhD, доцент Международного казахско-турецкого университета имени Ходжи Ахмеда Ясауи (Казахстан, г. Туркестан), e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz*

²*ТОО «Институт инновационных технологий и новых материалов»*

Исследования микроструктуры интерметаллидов на основе Ti-Al-Nb, после искрового плазменного спекания

Аннотация. В данной статье представлены результаты аналитического обзора отечественных и зарубежных исследований по проблеме получения интерметаллических материалов. Представлены краткие характеристики порошковых смесей интерметаллидов различных типов, общие сведения о структуре и их физико-механических свойствах, методы получения интерметаллидов. Также была проведена обширная экспертиза метода спеканий искровой плазмы, который в последнее время получил широкое распространение. Исследован элементный и фазовый состав материалов, полученных методом искрово-плазменного спекания, и их изменение по полученным глубинам дисперсных прекурсоров. Также рассмотрены заготовки, полученные методом искровой плазменной сварки и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Обсуждались метод диффузионной пары и метод направленной кристаллизации. Особое внимание было уделено вопросам формирования полученных интерметаллитов с использованием технологии искровой плазменной спекания, сделаны выводы о перспективах искровой плазменной обработки. Рассмотрены характеристики фазового равновесия тройной системы на основе титана, фазовый состав соответствующих сплавов и их структуры.

Ключевые слова: интерметаллический, микроструктура, искровое плазменное спекание, физико-механические свойства.

Кіріспе.

Өнеркәсіпте құрылымдық материалдар ретінде интерметаллидтер кеңінен қолданылады. Шульце 1967 жылы металларалық қосылыстарды құрамында екі немесе одан да көп металл элементтері бар қатты фазалар ретінде анықтады. Интерметаллидтер компоненттер арасында тұрақты қатынасқа ие. Интерметаллидтер негізінен тордағы атомдар арасындағы металл байланысымен сипатталады, бірақ химиялық байланыстың иондық және ковалентті түрлері бар интерметаллидтер, сондай-ақ аралық жағдайлар (иондық металл және ковалентті металл байланысы) бар.

Интерметаллидтер әдетте жоғары қаттылыққа және жоғары химиялық төзімділікке ие. Көбінесе интерметаллидтердің балқу температурасы бастапқы металдарға қарағанда жоғары болады. Интерметаллидтер бастапқы металдарға қарағанда илгіштігі төмен және олардың құрылымына кіретін қорытпаларға сынғыштықтың жоғарылауы туралы хабарлайды, өйткені олардағы тордағы атомдар арасындағы байланыс металдан ковалентті немесе ионға ауысады.

Көптеген интерметаллидтердің жоғары сынғыштығы, әсіресе бөлме температурасында, олардың қолдану аясын шектейді. Алайда, металлитті қорытпалар жоғары өнімділік қасиеттерін (тозуға төзімділік, ыстыққа төзімділік, коррозияға төзімділік) қажет ететін бөлшектердің беткі қабаттарын қалыптастыру үшін сәтті қолданыла алады [1].

Перспективті құрылымдық материалдарға интерметаллидтердің келесі түрлері жатады:

1) A_3B типтегі фазалар текше кристалды тормен $Li_2(Ni_3Al, Ni_3Si, Ni_3Mn, Zr_3Al)$;
2) A_3B типті фазалар алтыбұрышты тормен $DO_{19}(Ti_3Al, Ti_3Sn)$;
3) $MeAl_3$ типті алюминидтер ($NbAl_3, NiAl_3, TaAl_3, TiAl_3, ZrAl_3$); олардың кристалдық құрылымдары әртүрлі;

4) Li_2 кристалды торы бар АВ типті фазалар ($TiAl, CuAu$);

5) В2 кристалды құрылымы бар АВ типті фазалар ($NiAl, CoTi, CoZr, NiBe, FeCo, TiNi$);

6) Силицидтер ($MoSi_2; NbSi_2; Ni_3Si; TiSi_2; Ti_5Si_3; Mg_2Si; CoSi_2$);

Жоғары температуралы металлитті қорытпалар келесі қасиеттерге ие болуы керек: жоғары беріктік және ыстыққа төзімді меншікті өнімділік, шаршауға жеткілікті қарсылық, қолайлы икемділік және өңдеу, коррозияға және тотығуға төзімділігі жоғары [2].

Интерметаллидтерді қолдану ауқымы өте кең. Олардан жабдықтардың, қондырғылардың әртүрлі компоненттері мен бөлшектері шығарылады. Сонымен қатар, олардан жасалған өнімдер керемет жұмыс параметрлерімен ерекшеленеді.

Мысалы, олардың құрамында титан бар алюминий әртүрлілігі (салмағы аз және кристалл аралық коррозиядан тамаша қорғанысымен ерекшеленеді) авиация өнеркәсібінде және ғарыш өнеркәсібінде өз қолданысын тапты. Олардан ұшақтардың, ғарыш кемелерінің әртүрлі техникалық тораптары шығарылады. Олар реактивті әскери ұшақтардың ұялы конструкцияларын орнатуда, фюзеляж бөлшектерін, форсаж камераларының саптамаларын жасауда қажет. Олар ұшу аппараттарының, механикалық тораптардың тіректерінің, турбиналардың корпустарының ішіне құбырлы коммуникацияларды төсеу кезінде қолданылады. Олар әуе және ғарыш кемелерін, зондтар мен спутниктерді қаптау кезінде өздерін жақсы дәлелдеді. Металларалық қорытпалар негізінде өндірілген оқшаулау экстремалды температураға еш қиындықсыз төтеп бере алады, ауасыз кеңістікте жойылмайды, термиялық кеңеюдің минималды дәрежесіне ие [3].

Оларды қолданудың тағы бір бағыты – медицина. Стоматологияда олар тіс импланттарын жасауда өздерін жақсы дәлелдеді. Көбінесе олар құралдар мен жабдықтар, ауруханалар, емдеу және алдын алу орталықтары үшін қолданылады. Интерметаллидтер адамның экономикалық қызметінің әртүрлі салаларында кеңінен қолданылатын өте танымал қорытпалар деп айтуға болады. Олар өздерінің керемет өнімділігі арқасында практикалық және тозуға төзімділігін дәлелдеді. Бұл материалдардың өнертабысы бірқатар заманауи өндірістердегі экономикалық серпілісті алдын-ала анықтады [5].

Металларалық қосылыстар тек кристалды түрде болуы мүмкін, оларда жеке молекулаларды оқшаулау мүмкін емес, оларды жеке тұлғаны жоғалтпай балқыту немесе еріту мүмкін емес, олар газ фазасында болмайды, сонымен қатар олардың физика химиялық қасиеттері компоненттердің қасиеттерінен айтарлықтай ерекшеленеді. Химиялық қасиеттері бойынша белгілі бір құрамдағы интерметаллидтер оларды құрайтын металдардан ғана емес, сонымен қатар компоненттердің басқа қатынасы бар бірдей элементтік құрамдағы интерметаллидтерден де ерекшеленеді [4-6].

Интерметаллидтер әртүрлі тәсілдермен алынады – доғалық және индукциялық пештерде балқыту, оксидтердің алюминотермиялық тотықсыздануы және галогенидтер, балқымалардан кристалдардың электролизі, кальций гидридінің тотықсыздануы және басқа әдістер [7-8]. Ең қарапайым және кеңінен қолданылатын әдіс-балқыту немесе пісіру арқылы таза бастапқы металдардың синтезі. Пісіру үшін бастапқы компоненттер қыздыруға ұшырайтын ұнтақтар қоспасы түрінде алынады. Бұл жағдайда орын алады материалдың тығыздалуына да, реакция қоспасының көлемінің ұлғаюына да әкелуі мүмкін қосылыс

синтезінің химиялық реакциясы. Интерметаллидтердің түзілуі экзотермиялық процесс болғандықтан, пісіру кезінде реактивті шихта қатты қызады. Сондықтан процесс әдетте реакциялық пісіру режимінде қатты фазада төмен температурада жүзеге асырылады [9]. Металдарды балқыту индукциялық және доғалық пештерде жылдам сумен салқындатумен және инертті ортада жүзеге асырылады бұл соңғы өнімдердің ластану мүмкіндігін айтарлықтай төмендетеді. Бірақ температураның үлкен айырмашылығы тепе-теңдік жағдайларына және жоғары жылу-механикалық кернеулердің пайда болуына әкеледі, бұл құйманы гомогенизациялау үшін бірнеше рет балқыту қажеттілігін тудырады [10].

Интерметаллидтерді өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез әдісімен алу.

1967 жылы А.Г. Мержанов, И.П. Боровинский және В.М. Шкиро «автотехникалық қатты фазалық реакциялардың толқындық локализация құбылысы» ашылып, оның негізінде өзін-өзі тарату әдісі құрылды, жоғары температуралы синтез [11] (шетел әдебиетінде «combustion synthesis» [12] термині қолданылады).

Теориялық сипаттау үшін өздігінен таралатын жоғары процестерінің квазигомогендік модель жануы қолданылады [13], негізделген жану теориясы, әзірленген Я.Б. Зельдовичем, Д.А. Франк-Каменецким және оларды ұстанушылар [14]. Оның негізінде термиялық біртектілік принципі жатыр, ол реактив бөлшектерінің мөлшеріне қарамастан реакциялық қоспаны орташа жылу-физикалық сипаттамалары бар біртекті орта ретінде ұсынуға болады деген болжамнан тұрады. Бұл реакция нәтижесінде қатты фазалы диффузия әсерлесуші құрамдас қабаты арқылы өнім және шектеу сатысы жану процесі болып табылады. Алайда мұндай болжамдар әрдайым қолданыла бермейді.

Өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез ұнтақ қоспаларында престелген дайындама түрінде немесе жаппай түрінде жүзеге асырылады. Осылайша дайындалған шихта әдетте отқа жағылады электр тогымен қыздырылған вольфрам спиралімен. Осындай жергілікті бастамадан кейін реакция өздігінен шихта бойымен қозғалады, нәтижесінде реакция өнімін қалыптастыру үшін үлгінің толық жануына. Сонымен қатар, бастапқы шихтаны алдын-ала қыздыру мүлдем қажет емес немесе шихта салыстырмалы түрде төмен температураға дейін қызады, шамамен 100÷600°C диапазонында, бұл сұйық фазаның өмір сүру уақытын ұзартуға мүмкіндік береді, ол жеңіл балқытын компонентті балқыту арқылы немесе эвтектика пайда болған кезде пайда болады. Балқыманың болуы реакция компоненттерінің өзара диффузия процесін едәуір жылдамдатады және сұйықтықтың шихта бөлшектеріне капиллярлық таралуына байланысты жанасу аймағын арттырады.

Диффузиялық жұп әдісі.

Диффузиялық әдіс жартылай өткізгіш мембрана немесе диффузиялық канал арқылы газ ағынына су буының диффузиясының белгілі бір жылдамдығын орнатудан тұратын берілген газ ылғалдылығын көбейту әдісі. Екі металл арасында изотермиялық жолмен түзілетін диффузиялық аймақ қимасы бойынша компоненттер концентрациясының өзгеруін зерттеуге негізделген диффузиялық жұп әдісі құнды және перспективалы болып табылады, компоненттердің өзара әрекеттесу заңдылықтарын және олардағы фазалардың пайда болуын анықтау. Заманауи жоғары ажыратымдылықтағы құрылғылардың арқасында ол көптеген жолдармен классикалық әдістерден асып түседі және сайып келгенде, зерттелетін жүйелердің күй диаграммаларының құрылымын нақтылауға мүмкіндік береді.

Классикалық мағынада диффузиялық аймақ, Я.Е. Гегузиннің пікірінше, бұл жүйенің компоненттерінің гетерогенді таралуы болатын кристалды дененің аймағы, нәтижесінде атомдардың диффузиялық қозғалысы жүреді, бұл үлгінің барлық көлемінде тепе-теңдік диаграммасымен анықталған фазалық құрамның орнатылуына әкеледі [15]. Осы теорияны дамыту арқылы А.А. Коденцов голландиялық авторлармен, «реакция аймағы» ұғымы негізделді [16]. Бұл «реакция аймағы» ұғымы қажет болды, өйткені диффузиялық аймақта компоненттердің белгілі бір концентрациясы жинақталғаннан кейін фазалық түрлендірулер

басталады. Физика-химиялық тұрғыдан алғанда, көп фазалы жүйенің барлық қабаттарының бір уақытта пайда болу ықтималдығы енді қалың емес, жұқа (шамамен 10 нм) пленкаларда болады. Сонымен қатар, В.И. Дыбков [17] қарапайым заттардан, олардың химиялық қосылыстарынан тұратын реакциялық жұптарды барлық комбинацияларда зерттеу ұсынылады.

Диффузиялық жұп әдісі жоғары температурада өңдеуге негізделген диффузиялық процестерге байланысты жанасатын металдар. Облыста байланыс белгілі бір құрылымға ие диффузиялық зона арқылы жасалады. Есебінен құрылымдық ерекшеліктері мен жеке параметрлері, өзара диффузия коэффициенті, нүктелік ақаулардың концентрациясы ретінде әр уақытта өзінің жеке құрылымы қалыптасады. Алайда, әр түрлі металдардағы қасиеттердің ұқсастығына байланысты құрылымда жалпы белгілер болуы мүмкін: екінші фазалық бөлшектер ансамблі, және көп қабатты құрылым, бір компоненттің екіншісінде қатты ерітіндісі бар аймақтар, кеуектілік (Френкель мен Киркендалл бойынша), белгілі бір қабаттардың сынғыштығын көрсететін жарықтар, кеуектер мен фазалар арасындағы интерфейстер жарықтар интерфейс және қанықпаған болып саналады нүктелік ақаулар үшін де, қоспа элементтері үшін де ағынды сулар [18].

Бағытталған кристалдану әдісі.

Кристалдық құрылымның ақауларын азайтуға қол жеткізетін бағытталған кристалдану әдісі негізгі кернеулердің әсер ету бағытына бағытталған бір немесе бірнеше макроэрднен тұратын пішінді құймаларды алу үшін қолданылды. Мұндай макроқұрылым құйманың бір ұшын тез салқындату және қарама-қарсы ұшының кристалдануын бәсеңдету арқылы алынады.

Шетел әдебиеттерінде FZ-UDS method (unidirectional solidification employing a floating zone method) термині қолданылады. 60-жылдары Frank Van snyder әріптестерімен бірге пышақ қалақтарын бағытталған кристалдану технологиясын жасады. Әдістің мәні мынада: стильде қабық пішіндеріне құю дендритті кристалдардың бір бағытта өсуіне әкелетін бағытталған жылу тарату жағдайларын қамтамасыз етеді. Бұл жағдайда қалыптасатын бағытталған құрылым ең үлкен кернеулердің әсер ету бағытына бағытталған бір-біріне параллель ұзын бағаналы кристалдармен ұсынылған. Дәндердің бұл бағыты жоғары температураға дейін қыздырылған кезде материалдың беріктік қасиеттерінің жоғары көрсеткіштеріне ықпал етеді [19]. Жоғары сапалы бағытталған кристалданған қорытпаларды алудың негізгі міндеті-механикалық қасиеттердің ең жақсы кешенін қамтамасыз ететін ең тиімді кристаллографиялық бағытта бағаналы кристалдардың өсуіне себеп болу [20-21]. Перспективалы әдістердің бірі-монокристалды матрицасы бар ыстыққа төзімді қорытпалардан шпатель жасау әдісі. Осылайша алынған өнімдерде астық шекарасының әлсіз жерлері жойылды.

Ұшқын плазмалық пісіру әдісі.

Ұшқын плазмалық пісіру – әлемде кеңінен таралып келе жатқан әртүрлі материалдарды алудың перспективалық әдісі [22]. Ұнтақты материалдарды консолидациялаудың бұл әдісінің ерекшеліктері мынада: затты қыздыру электр тогының импульстарын өткізу арқылы жүреді; бұл әдеттегі пісіру мен ыстық престеумен салыстырғанда температураны айтарлықтай төмендетуге және пісіру уақытын қысқартуға мүмкіндік береді.

Соңғы жылдары интерметаллидтер мен олардың негізіндегі материалдарды ұшқын плазмалық пісіру әдісімен алуға қызығушылықтың артуы байқалған. Ұнтақ қоспасына жоғары температуралық әсер етудің қысқа мерзімділігі, материалдың қыздыру және деформация режимдерінің оңтайлы қатынасы, сондай-ақ үлгі арқылы электр тогының өту ерекшеліктері арқасында ұшқын плазмалық пісіру технологиясы кеуектілігі төмен және қалдық механикалық кернеулері бар жоғары беріктігі бар өнімдерді алуға мүмкіндік береді. Осы технологияны қолдана отырып, ұсақ түйіршікті құрылымды сақтауға болады, бұл пісірілген материалдың механикалық қасиеттерін арттыруға көмектеседі. Дегенмен, осы

технология интерметаллидтердің икемділігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік бермеді. Пісірілген материалдардың икемділік көрсеткіштерін жақсарту әрекеттері пісірілген бөлшектердің шекараларын өзгертумен байланысты.

Материалдарды жылдам электро-механикалық пісіруге арналған қондырғылар 1966 жылы Жапонияда С. Иноэ жұмысының арқасында айтарлықтай дамыды [23]. Алайда, бұл технология бірқатар себептерге байланысты, негізінен экономикалық тұрғыдан кеңінен қолданылмады. Бұл мәселеге деген қызығушылық соңғы жылдары наноғылымның дамуына байланысты қайта жанданды. Шынында да, ҰП-пісірудің бүкіл процесі (20-40) минуттан аспайды, бұл дәстүрлі технология бойынша нанокерамиканы алу уақыты 30 есе аз. Бұл факт ұнтақтың қайта кристалдануын күрт тежейді және әсіресе ұсақ түйіршікті құрылымды алу үшін қолайлы.

Қарсылық пісіру мен электрлік импульстік пісіру процестерінің негізгі айырмашылығы үлгіде электр разрядтарын жасайтын импульстік режимде тұрақты токтың соңғы жағдайында пайдалану [24]. Жоғары тығыздықтағы қосымшаны алу үшін үлгіге ток жеткіліксіз. Сондықтан ұнтақ қоспасындағы бөлшектердің шоғырлану процесіне ықпал ететін қосымша факторлар ретінде механикалық қысым мен жылу қолданылады. Ең танымал және кең таралған ұшқын плазмалық пісіру әдісі, оны жүзеге асырған кезде 1-300 мкс тұрақты ток импульстары бүкіл пісіру кезеңінде үлгі арқылы өтеді [25-28].

Ұшқын плазмалық пісіру әдісінің негізін қалаған Ресейде 1891 жылы Н.Г. Славянов «металл құюды электрлік тығыздау әдісіне» патент алған кезде жасалды [26], бірақ оны зертханалық қондырғылар жүйесі ретінде Жапонияда Sumitomo Heavy Industries, Ltd компаниясы жүзеге асырды. 1990 жылдардың аяғында ол ұшқын плазмалық пісіру [27] деп аталатын ұнтақты пісіру технологиясын жүзеге асыру үшін өнеркәсіптік және зертханалық жабдықтар шығара бастады.

Ұшқын плазмалық пісіру технологиясы «қосу-өшіру» режимінде тұрақты токтың өтуін қамтиды. Бөлшектердің жанасу нүктелерінде ток ағыны кезінде электр разрядтары пайда болады, бұл температураның жергілікті жоғарылауына әкеледі. Бұл жағдайда материалдың балқуы жүреді, диффузиялық процестер күрт жеделдетіледі. Ток өткізудің келесі кезеңінде жоғары температуралы аймақтар үлгінің басқа нүктелерінде пайда болады. Осылайша, процесс дайындаманың бүкіл көлемінде материалдың біркелкі пісіруді қамтамасыз етеді.

Ұнтақ бөлшектерінің жанасу аймақтарында пісіру кезінде оксид пленкалары бұзылады, бұл ұнтақ қоспасының тиімді ықшамдалуына ықпал етеді. Импульстік токты қолдану пісіру ұзақтығын бірнеше минутқа дейін төмендетуге мүмкіндік береді. Материалдың жоғары қыздыру жылдамдығы дәл осындай әсерге әкеледі. Материалдың жоғары температурада қысқа мерзімді болуы жағдайында астық құрылымын ірілендіру процесі жүруге уақыт жоқ. Наноөлшемді ұнтақтардан алынған материалдардағы астықтың орташа мөлшері [29-30] жұмыс деректері бойынша 50-200 нм құрайды. Сарапшылар ұшқын плазмалық пісіру әдісінің жоғары тиімділігі материалды тығыздау мен материалды қайта кристалдандыру нәтижесінде бөлшектердің өсуі арасындағы тепе-теңдікке байланысты екенін атап өтті.

Ұшқын плазмалық пісіру процесі вакуумда немесе инертті газ – аргон немесе гелий ортасында жүзеге асырылады [31]. Жоғары қыздыру температурасы қажет болған жағдайда (1300 К дейін) графит қалыптары жиі қолданылады, ал вольфрам карбиді немесе тот баспайтын болаттан жасалған қалыптар төмен температурада артықшылықтарға ие, өйткені олар жоғары қысымға төтеп бере алады. [32-33] еңбектерінде авторлар нақты деп эксперименталды түрде анықтады пісірілген үлгінің температурасы 120-160°C жоғары матрицаның сыртқы жағындағы температуралар, ал үлгінің ортасы мен оның сыртқы жағы арасындағы температуралық айырмашылықтар ~ 30°C. Бұл ұшқын плазмалық пісіру процесінде ұнтақ қоспасының тез қызуына байланысты.

Қазіргі уақытта ұшқын плазмасының пісіру механизмі толық зерттелмеген. Бөлшектер арасында плазманың пайда болуына қатысты әлі де келіспеушіліктер бар. Атап айтқанда,

жұмыс авторлары [34] плазманың болуын, соның ішінде электр кернеуін ультра жылдам өлшеу кезінде жаза алмады.

Ұшқын плазмалық пісіру технологиясын қолданудың басты артықшылығы ұнтақтарды төмен температурада тығыздау және олардың стандартты қатты күйдегі синтезбен салыстырғанда әлдеқайда аз уақыт. Осының арқасында сіз жоғары сапалы материалдарды ала аласыз. Әдебиеттерде ұшқын плазмалық пісіру әдісін қолдану нәтижесінде пісіру процесінің бес жүз есе азаюы туралы мәліметтер келтірілген.

Ұшқын плазмалық пісіру әдісін пісірілген материалдардың кеуектілігін тиімді бақылауға және қосылыстардың үлгілерін алуға мүмкіндік береді, оларды әдеттегі басу іс жүзінде мүмкін емес. Ұшқын плазмалық пісіру материалдарды өндіру кезінде энергия шығынын азайтудың мүмкін әдістерінің бірі болып табылады. процесін жүргізу кезінде материалды қысыммен алдын-ала өңдеу қажет емес және арнайы байланыстырушы компоненттерді қолданудың қажеті жоқ. Бөлшектерді дайындау бірден соңғы формада жүзеге асырылады. Бұл жағдайда ұнтақтардың бастапқы микроқұрылымы сақталады. Сонымен қатар, талданатын әдісті қолдана отырып, термиялық тұрақтылығы төмен мүлдем жаңа типтегі материалдарды алуға болады [35].

Осылайша, импульстік токтың әсерінен ұнтақ бөлшектерін біріктіру процесін күшейту пісіру ұзақтығын бірнеше минутқа дейін төмендетуге мүмкіндік береді. Жоғары қыздыру жылдамдығы жоғары температурада материалдың жалпы уақытының қысқаруына әкеледі. Салыстырмалы түрде төмен қыздыру температурасы және Материалды өңдеу процесінің қысқа ұзақтығы материалдың құрылымдық өзгерістерін сенімді бақылауға мүмкіндік береді.

Ұшқын плазмалық пісіру технологиясының дәстүрлі ыстық престоуден басты артықшылығы бөлшектердің жанасу аймақтарындағы жергілікті температураның жоғары мәндері. Материалдың пісіруін үлкен жылдамдығы ондағы метастабильді құрылымның пайда болуына себеп болуы мүмкін. Ұнтақ бөлшектері арасында пайда болатын электр разряды олардың бетінен оксидтер мен адсорбцияланған қоспалардың қабықшаларын алып тастайды және осылайша оларды кейіннен пісіру үшін белсендіреді [36].

Ұшқын плазмалық пісіру процесіне, алынған материалдардың құрылымы мен қасиеттеріне келесі пісіру параметрлері әсер етеді: қыздыру жылдамдығы, пісіру ортасы, электр тогының мөлшері (ұнтақ материалына «айдалатын» энергия мөлшері), престоу қысымы, температура және изотермиялық ұстау ұзақтығы [37].

Ұшқын плазмалық пісіру технологиясы мен дәстүрлі ыстық престоу арасындағы ең маңызды айырмашылық қыздыру жылдамдығы болғандықтан, оның пісірілген материалдардың соңғы тығыздығына әсері туралы мәселе үлкен қызығушылық тудырады. Жоғары қыздыру жылдамдығы пісіру процесінің ұзақтығын қысқартуға және консолидация процесінде ұнтақ бөлшектерінің өсуін шектеуге мүмкіндік береді. Бұл процесте ұшқын плазмалық пісіру жылыту жылдамдығының кең интервалында пісіруді жүзеге асыра алады және атап айтқанда, наноматериалдарды жасау үшін маңызды болып табылатын жоғары жылдамдықты жылытуды ($103\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ дейін) қамтамасыз етеді [38].

Ю.М. Анненков жұмысында керамиканың ұшқын плазмалық пісірудің механизмі ұсынылған, оның негізінде жергілікті температура градиенттері есебінен материалда пайда болатын атомдардың термодиффузиялық ағындары жатыр. Керамикалық жақтаудың пайда болуына және тері тесігін қарқынды емдеуге әкелетін құбылыстар қарастырылады. Алынған формулалар негізінде ұшқын плазмасының пісірілуінің уақыты есептеледі, ол тәжірибелі мәліметтермен қанағаттанарлық сәйкес келеді [39].

Ұшқын плазмасының пісірудің ықтимал микромеханизмі ұсынылған, оның негізінде термодиффузиялық диффузия қоздыратын жеделдетілген диффузия жатыр, «жыпылықтайтын» температура градиенттерінің әрекеті. Процестің екі кезеңі қарастырылады: пісіру кезінде керамикалық қаңқаның пайда болуының термодиффузиялық механизмі және пісіру кезінде тері тесігін емдеудің термодиффузиялық механизмі.

Ұсынылған теория бойынша қажетті есептеулер жүргізілді, есептеу нәтижелері эксперименттік деректерді қанағаттанарлықтай сипаттайды.

Ж.В. Еремееваның жұмысында ұшқын плазмасының пісірілуінің оңтайлы режимдері анықталды: температура, уақыт, қысым күші және бор карбидінің пісірілген дайындамаларының құрылымы мен қасиеттері күйі мен бор аморфты механохимиялық синтезден алынған ұнтақтардан, өздігінен таралатын жоғары температуралы синтезден (ӨЖС) және көміртекті тотықсыздандыру әдісімен зерттелді [40].

Механосинтез арқылы алынған V_4C ұнтақтарынан дайындамаларды ұшқын плазмалық пісірудің оңтайлы режимдері 45 минут ішінде пісіру кезінде $1500^\circ C/25$ Мпа болып табылады, бұл ретте тығыздығы 99,0% құрайды.

Механосинтез, өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез әдісі, көміртекті тотықсыздандыру арқылы алынған, сондай-ақ күйе мен аморфты бор қоспасынан ұшқын плазмалық пісіру процесінде алынған V_4C ұнтақтарынан алынған құрылымды зерттеу процесінде пайдаланылатын әрбір ұнтақ үшін ұшқын плазмалық пісірудің рационалды режимдері орнатылған. Өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез әдісімен алынған ұнтақтар үшін пісірілген дайындамалардың тығыздығы 98,5% құрайды, $1800^\circ C/30$ МПа және пісіру уақыты 45 мин.

Күйе ұнтақтары мен аморфты бор қоспасының тікелей ұшқын плазмалық пісірудің оңтайлы режимдері анықталды. Ұшқын плазмалық пісіру кезінде $-2000^\circ C$ температурада және 50 МПа қысымда 80 мин ішінде аморфты күйі мен бор ұнтақтарының қоспасынан дайындамалардың тығыздығы 92-95% құрады.

Л.И. Шевцованың жұмысында бастапқы никель ұнтақтарының алдын ала механоактивация процесстерін біріктіретін әртүрлі схемалар бойынша алынған Ni_3Al интерметаллидінің құрылымы мен механикалық қасиеттеріне зерттеулер жүргізілді және алюминий, өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез және ұшқын плазмалық пісіру бойынша тәжірибелер келтіріледі. Барлық пісірілген материалдардың салыстырмалы тығыздығы $\sim 97\%$ екендігі анықталды. Микроқаттылық алынған үлгілер 6100...6300 МПа диапазонында. Пісірілген материалдардың иілу беріктігі 785...800 МПа құрайды. Созылу беріктігінің максималды деңгейіне (400 МПа) $Ni + 13,29$ масса. %Al. ұнтақ қоспасының үш минут ішінде механикалық белсендірілген 1100 температурада пісіру процесінде қол жеткізіледі. Бұл технологиялық процесс ең ұтымды болып табылады. Оны жүзеге асыру кезінде реагенттердің химиялық өзара әрекеттесу кезеңі пісіру процесімен біріктіріледі [41].

И.С. Иванчик жұмысында ұнтақ қоспасының электроскратты плазмалық пісірілуі арқылы алынған Ni_3Al поликристалды интерметалл қосылысының микроқұрылымы мен механикалық қасиеттеріне цирконийдің әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Пісіру үлгілерін жасау үшін никель, алюминий және цирконий ұнтақтарына негізделген қоспалар қолданылды. Цирконийдің әр түрлі концентрациясы бар үш композиция дайындалды (0,1; 1 және 5 масса.%). Металлографиялық зерттеулер барысында пісірілген материал құрылымының басым біртектілігі анықталды. Барлық үш құрамның пісірілген материалдарының салыстырмалы тығыздығы 97% құрайтыны анықталды. Пісірілген материалдардың беріктік сынақтарының нәтижелерін талдау цирконийдің никель алюминидінің иілуіндегі беріктік шегіне, цирконийдің қорытпадағы концентрациясы 1 % массаға тең болған кезде оң әсерін көрсетеді [42].

Y.D. Huang жұмысында біз ұнтақты металлургияның әртүрлі әдістері үшін Fe_3Al интерметаллидін алудың мүмкін жолдарын зерттедік. 1050 және $1150^\circ C$ температурада $Fe+14Al$, $Fe +15Al$ ұнтақ қоспаларының соққы пісіру кеуекті емес үлгілерді алуға мүмкіндік береді, ал 1400 және $1450^\circ C$ температурада еркін пісіру сәйкесінше 15 және 6% кеуектілігі бар үлгіні береді. Соққы пісіру мен ыстық соғуды қолдану Fe_3Al қатты металлидін еркін пісірумен салыстырғанда жоғары механикалық қасиеттерге ие етуге мүмкіндік беретіні анықталды. Құрылымның өзгеруі механикалық қасиеттердің өзгеруіне әкелетіні көрсетілген

[43].

Ұшқын плазмалық пісіру әдісімен алынған үлгілердің құрылымы мен механикалық қасиеттеріне зерттеулер жүргізілді 1000, 1100 және 1150 °С температурада ПН85Ю15 ұнтағының 85...95 %. Пісірілген материалдардың микроқаттылығы 3950...4100 МПа. 890 МПа болатын иілу кезіндегі беріктік шегінің максималды деңгейіне қол жеткізілді. Тығыздықты арттыру және кеуектілікті азайту үшін ұнтақ материалды ұнтақтау немесе наноөлшемді бөлшектердің пісірілген қоспасына қосу ұсынылды [44].

Көлемдік үлгілердің элементтік және фазалық құрамы, олардың дисперсті прекурсорлардың ұшқын плазмалық пісіру әдісімен алынған тереңдігі бойынша өзгеруі зерттелді. Электрохимиялық синтез параметрлерінің өзгеруі ұшқын плазмалық пісіруде интерметаллидтердің шығымы 95-97%-дан асатын әртүрлі реттелетін фазалық қатынасты қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Конденсацияланған, адсорбцияланған және мүмкіндігінше химиялық байланысқан суды кетіру құрамын азайтуға мүмкіндік береді, оксид фазасы <0,5 %. Пісірілген пішінді материалды көміртегі жоқ затпен ауыстыру карбид фазаларының түзілуін жеңеді [45].

Д.В. Лазуренканың жұмысында «Металл-интерметаллид» жүйесінің көп қабатты материалдарының құрылымын қалыптастыру ерекшеліктері қарастырылған. Металлидті қабаттары бар жоғары сапалы қабатты материалдарды қалыптастырудың тиімді технологиясы 830 °С және 5 минут ішінде 3 кН қысымда цилиндрлік пішіндегі металл дайындамалардың ұшқын плазмалық пісіру болып табылады. Көрсетілген режимдерде өңдеу материалды жоғары сапалы интерметаллидті фазалық қабаттармен және 3800 МПа дейінгі микроқаттылықпен алуға мүмкіндік береді [46].

Құрамында дисперсті прекурсордың ұшқын плазмалық пісіру арқылы темір, кобальт және алюминий элементтері бар, қаттылығы жоғары образам үлгі алынады. Үлгілерді жоғары механикалық сипаттамалары пісіру процесінде интерметаллидтердің пайда болуына байланысты екендігі көрсетілген [47].

М.Е. Колпаков зерттеуінде бір мезгілде α -Fe, Co және Al элементтері бар үлгілер поликристалды жүйе түрінде электрохимиялық әдіспен алынды және жуудан және кептіруден кейін ұшқын плазмалық пісіру жүргізілді. Fe-Co-Al жүйесінің дисперсті прекурсорларының қалыптасу заңдылықтарын зерттеу және сипаттау бұрын жүргізілген [48].

Ш.Р. Курбанбеков жұмысында Ti-Al-Nb композит алу үшін бастапқы шикізат ретінде Ti (99,9 %), Nb (99,96 %) және Al (99,98%) ұнтақтары пайдаланылды. Ti-Al-Nb жүйесінің металлидтері негізінде үлгілерді жасау үшін жұмыста ұнтақ қоспаларының ұшқын плазмалық пісіру технологиясы қолданылды. Ұнтақ қоспаларын пісірілуі Labox-1575 арнайы қондырғысында жүргізілді. %Al-21at.%Nb эксперименттік қондырғысында 450°C, 500°C және 550 °С температурада жүргізілді [49].

Қорытынды

Қазіргі таңда дайындамаларды ұшқын плазмалық пісіру кезінде салыстырмалы тығыздықтың ең үлкен мәніне, яғни алынған үлгілердің тығыздығы 95-98% құрағандығы байқалды. Ал өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез әдісімен алынған материалдар үшін пісірілген дайындамалардың тығыздығы 98,5% болды.

Физика-механикалық қасиеттерін зерттеуде интерметаллидті материалдардың микроқаттылық сипаттамасы бойынша 3800-6300 МПа аралығында нәтиже алынды. Тәжірибеге қолданған металлдардың иілу беріктігі 785-800 МПа құрады. Созылу беріктігінің жоғарғы деңгейінде ұнтақ қоспаларының аз уақыт ішінде механикалық активтендірілген температурада ұшқын плазмалық пісіру процессінде қол жеткізілді.

Ұшқын плазмалық пісіру әдісі арқылы көлемдік үлгілердің элементтік және фазалық құрамы бойынша өзгеруі зерттелді. Электрохимиялық синтез параметрлерінің өзгеріске ұшырауынан аталған әдісте интерметаллидтердің шығымы 95-97%-дан асатын бірнеше

фазалары алынды және оксид фазасы $<0,5\%$ болатындығы анықталды. Ғылыми-зерттеу жұмыстарынан алынған жоғарыда келтірілген деректер бойынша, ұшқын плазмалық пісіру технологиясы – ұнтақ бөлшектері арасында пайда болатын электр разряды олардың бетінен оксидтер мен бөлшектердің әсерлесу аймақтарындағы температураның жоғары мәндеріне байланысты металлды пісіруін жоғары жылдамдықпен метастабильді құрылым пайда болатындығы зерттеу нәтижесінде белгі болды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Ковтунов А.И., Мямин С.В. Интерметаллидные сплавы // – ФГБОУ ВО, – 2018. – 432 с.
2. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов / М.: – МИСИС издательский дом, 2008. – 326 с.
3. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии / М.: – МИСИС издательский дом 2017. С. 186–184.
4. Григорьева Т.Ф., Баринаова А.П., Ляхов Н.З. Интерметаллиды – новый класс лёгких жаропрочных и жаростойких материалов. / М.: – МИСИС издательский дом – 2015. С. 414–416.
5. Соколовская Е.М., Гузеи Л.С. Металлохимия. Издательство МГУ / М.: – МИСИС издательский дом – 2000. С. 2–3.
6. Вол А.Е. Структура и свойства двойных металлических систем / М.: – МИСИС издательский дом – 2009. С. 907–913.
7. Баррет Ч.С., Масальски Т.Б. Структура металлов. Т.2. Металлургия / – 2019. – 211с.
8. Умански Я.С., Скаков Ю.А. Физика металлов // М.: – МИСИС издательский дом – 2011. – 412 с.
9. Итин В., Найбороденко. Ю.С. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. М.: Физматлит – 2011. – 227 с.
10. Браун А., Вестбрук Дж. Методы получения интерметаллидов. Интерметаллические соединения // М.: Физматлит – 2014. С. 5–6.
11. Мержанов А.Г. Способ синтеза тугоплавких неорганических соединений. Авт. свид. № 255221 / А.Г. Мержанов, В.М. Шкиро, И.П. Боровинская // М.: Физматлит – 1967. – 112 с.
12. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / А.Г. Мержанов, И.П. Боровинская /М.: Физматлит – 1972. С. 366–369.
13. Рогачев А.С., Мукасян А.С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику. – М.: Физматлит. – 2012. – 400 с.
14. Merzhanov A. G. Self-propagating high-temperature synthesis: Twenty years of search and findings // Combustion and plasma synthesis of high-temperature materials. – New York: VCH Publishers. – 1990. P. 1–53.
15. Raghavan, V. Al-Nb-Ti (Aluminum – Niobium – Titanium) / V. Raghavan // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2005. P. 360–368.
16. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства / М.: ВИЛС – МАТИ, 2009. – 520 с.
17. Ажажа В.М., Тихонов М.А., Шепелев А.Г. и др. // Вопросы атомн. науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – М.: Физматлит 2006. No 1. С. 145–152.
18. Huang A., Hu D., Xinhua WuLoretto, M.H. The Influence of Interrupted Cooling on the Massive Transformation in Ti46Al8Nb // Intermetallics. – 2007. – 144 p.
19. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учеб. для вузов / А.Б. Колачёв, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – Москва, – 2005. – 432

с.

20. Effect of interface behavior between particles on properties of pure Al powder compacts by spark plasma sintering [Text] / G. Xie, O. Ohashi, T. Yoshioka, M. Song, K. Mitsuishi, H. Yasuda, K. Furuya, T. Noda // *Materials Transactions*. – 2001. – 42 p.

21. Toshio, M. Effects of unidirectional solidification conditions on the microstructure and tensile properties of Ni_3Al / M. Toshio, H. Toshiyuki // *Intermetallics*. – 1995. P. 23–33.

22. Баринов В.Ю., Рогачев А.С., Вадченко С.Г., Московских Д.О., Колобов Ю.Р. Искровое плазменное спекание. М.: Физматлит – 2018. – 224 с.

23. Колачѐв Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учеб. для вузов / А.Б. Колачѐв, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – Москва МИСиС, 2005. – 432 с.

24. Groza J.R. Nanostructures bulk solids by field activated sintering / J.R. Groza, A. Zavaliangos // *Reviews on advanced materials science*. M. Tokita – 2003. 24–32 p.

25. Tokita M. Trends in Advanced SPS (Spark Plasma Sintering) Systems and Technology / M. Tokita // *Journal of the Society of Powder Technology*. – 1993. P. 790–804.

26. Славянов Н.Г. Труды и изобретения / Н.Г. Славянов. – Пермь: Кн. изд-во, 1988. – 296 с.

27. Fridman S.R., Risovany V.D. Zakharov A.V., Toropova V.G. Radiation stability of WWER-1000 CPS AR absorber element with boron carbide // *VANT.S: Physics of radiation damages and radiation science of materials*. 2001. P. 84–90.

28. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering [Text] / R. Orru, R. Licheri, A.M. Locci, A. Cincotti, G. Cao // *Materials Science and Engineering*: M. Tokita – 2009. P. 127–287.

29. Munir Z.A. Synthesis and densification of nanomaterials by mechanical and field activation / Z.A. Munir // *Journal of Materials Synthesis and Processing*. M. Tokita – 2000. P. 189–196.

30. Lee J.W. Dense nanocrystalline TiB_2 - TiC composites formed by field activation from high-energy ball milled reactants / J.W. Lee, Z.A. Munir, M. Ohyanagi // *Materials Science and Engineering*: M. Tokita – 2002. P. 221–227.

31. Omori M. Sintering, consolidation, reaction and crystal growth by the spark plasma system (SPS) / M. Omori // *Materials Science and Engineering*: M. Tokita – 2000. P. 183–188.

32. Microstructures and mechanical properties of $TiAl$ alloys consolidated by spark plasma sintering / A. Couret, G. Molénat, J. Galy, M. Thomas // *Intermetallics*. M. Tokita – 2008. P. 1134–1141.

33. Effect of surface oxide films on the properties of pulse electric-current sintered metal powders / G. Xie, O. Ohashi, N. Yamaguchi, A. Wang // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2003. P. 2655–2661.

34. Tokita M. Trends in Advanced SPS (Spark Plasma Sintering) Systems and Technology / M. Tokita // *Journal of the Society of Powder Technology*. M. Tokita – 1993. P. 790–804

35. Synthesis of bulk $FeAl$ nanostructured materials by HVOF spray forming and Spark Plasma Sintering / T. Grosdidier, G. Ji, F. Bernard, E. Gaffet, Z.A. Munir, S. Launois // *Intermetallics*. M. Tokita – 2006. – Vol. 14. – P. 1208–1213.

36. Spark Plasma Sintering of nanoscale $(Ni+Al)$ powder mixture [Text] / J.S. Kim, H.S. Choi, D. Dudina, J.K. Lee, Y.S. Kwon // *Solid State Phenomena*. M. Tokita – 2007. P. 35–38.

37. Mamedov V. Spark plasma sintering as advanced PM Sintering method [Text] / V. Mamedov // *Powder Metallurgy*. – 2002. P. 322–328.

38. Болдин М.С. Физические основы технологии электроимпульсного плазменного спекания / М.С. Болдин. – учеб.-метод. пособие Нижегород. гос. ун-т. – Нижний Новгород, 2012. – 59 с.

39. Анненков Юрий Михайлович, Акарачкин Сергей Анатольевич и Ивашутенко

Александр Сергеевич // Физическая модель искрового плазменного спекания керамики. – 2012. С. 1–2.

40. Еремеева Ж.В., Мякишева Л.В., Панов В.С. Искровое плазменное спекание и горячее прессование заготовок из карбида бора, полученного различными методами. М. // «МИСиС» – 2018.

41. Шевцова Л.И. Структура и механические свойства интерметаллида Ni_3Al , полученного по технологии искрового плазменного спекания механически активированной порошковой смеси «Ni–Al» // М. Tokita – 2014. – 12 с.

42. Шевцова Л.И., Иванчик И.С., Волков Д.С., Немолочнов Д.А. // – Минск: Беларуская навука – 2019. С. 21–27.

43. Huang Y.D. Effect of thermomechanical processes on room-temperature mechanical properties of Fe_3Al -based alloys / Y.D. Huang, W.Y. Yang, Z.Q. Sun. Journal of Materials Science Letters. – 1998. P. 1781 – 1784.

44. Батаев И.А., Мали В.И., Анисимов А.Г. Влияние температуры нагрева на структуру и механические свойства материала, полученного искровым плазменным спеканием порошка ПН85Ю15. / – Минск: Беларуская навука – 2013. 36 с.

45. Колпаков М.Е., Дресвянников А.Ф., Доронин В.Н. Результаты исследования объемных образцов системы Al-Fe-Co, полученных sрс-методом. / – Минск: Беларуская навука – 2013. – 321 с.

46. Shuleshova T.G., Woodcock H.-G., et al. Metastable Phase Formation in Ti-Al-Nb Undercooled Melts // Acta Materialia. – 2007. P. 681–689

47. Колпаков М.Е., Дресвянников А.Ф., Доронин В.Н. Искровое плазменное спекание прекурсора на основе элементных Fe, Co, Al / – Минск: Беларуская навука – 2011. С. 1-2.

48. Колпаков М.Е. Образование металлических осадков на суспензионном алюминиевом электроде в водных растворах железа (III) и кобальта (II) // М.Е. Колпаков, А.Ф. Дресвянников Вестник Казан. технол. ун-та. – 2011. С. 173–178

49. Каракозов Б.К., Курбанбеков Ш.Р., Ситников А.А., Бакланов В.В, Скаков М.К. Исследование структурно-фазового состояния сплава $\text{Ti}_{23.5}\text{at.}\% \text{Al}-21\text{at.}\% \text{Nb}$, полученного методом искроплазменного спекания / – Минск: Беларуская навука, – 2017. С. 462–469.

REFERENCES

1. Kovtunov A.I., Myamin S.V. Intermetallidnye splavy [Intermetallic alloys] // – FGBOU VO, – 2018. – 432 s. [in Russian]

2. Kolachev, B.A. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka cvetnyh metallov i splavov [Metallogology and heat treatment of non-ferrous metals and alloys] / B.A. Kolachev, V.I. Elagin, V.A. Livanov / – MISIS izdatelski dom, – 2008. – 326 s. [in Russian]

3. Antipov V.V. Perspektivy razvitiya alyuminievyyh, magnievyyh i titanovyh splavov dlya izdelij aviacionno-kosmicheskoy tekhniki [Prospects for the development of aluminum, magnesium and titanium alloys for aerospace products] // Aviacionnye materialy i tekhnologii / 2017. S. 186–184. [in Russian]

4. Grigoreva T.F., Barinova A.P., Lyahov N.Z. // Intermetallidy – novyj klass lyogkih zharoprochnyyh i zharostojkih materialov [Intermetallides are a new class of lightweight heat-resistant and heat-resistant materials] – 2015. S. 414–416. [in Russian]

5. Sokolovskaya E.M., Guzei L.S. Metallohimiya [Metal chemistry] / Izdatelstvo MGU – 2000. S. 2–3. [in Russian]

6. Vol A.E. Stroenie i svojstva dvojnyh metallicheskih sistem [Structure and properties of double metal systems] / – 2009. S. 907–913. [in Russian]

7. Barret CH.S., Masalski T.B. Struktura metallov. T.2. Metallurgiya [Structure of metals. Vol.2. Metallurgy] – 2019. – 211 s. [in Russian]

8. Umanski YA.S., Skakov YU.A. Fizika metallov [Physics of metals] // – 2011. – 412 s. [in Russian]
9. Itin V., Najborodenko YU.S. Vysokotemperaturnyjsintez intermetallicheskih soedinenij [High-temperature synthesis of intermetallic compounds] // – 2011. – 227 s. [in Russian]
10. Braun A., Vestbruk Dzh. Metody polucheniya intermetallidov. Intermetallicheskie soedineniya [Methods of obtaining intermetallides. Intermetallic compounds] // – 2014. S. 5–6. [in Russian]
11. Merzhanov A.G. Sposob sinteza tugoplavkih neorganicheskikh soedinenij [Method of synthesis of refractory inorganic compounds]. Avt. svid. № 255221 / A.G. Merzhanov, V.M. Shkiro, I.P. Borovinskaya // – 1967. – 112 s. [in Russian]
12. Merzhanov A.G. Samorasprostranyayushchiysya vysokotemperaturnyj sintez [Self-propagating high-temperature synthesis] / A.G. Merzhanov, I.P. Borovinskaya / – 1972. S. 366–369. [in Russian]
13. Rogachev A.S., Mukasyan A.S. Gorenje dlya sinteza materialov: vvedenie v strukturnuyu makrokinetiku [Gorenje for the synthesis of materials: an Introduction to Structural Macrokinetics]. – M.: Fizmatlit. – 2012. – 400 s. [in Russian]
14. Merzhanov A. G. Self-propagating high-temperature synthesis: Twenty years of search and findings // Combustion and plasma synthesis of high-temperature materials. – New York: VCH Publishers. – 1990. P. 1–53.
15. Raghavan, V. Al-Nb-Ti (Aluminum – Niobium – Titanium) / V. Raghavan // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2005. P. 360–368.
16. Ilin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. Titanovye splavy. Sostav, struktura, svojstva [Titanium alloys. Composition, structure, properties] / M.: VILS – MATI, 2009. – 520 s. [in Russian]
17. Azhazha V.M., Tihonov M.A., Shepelev A.G. i dr. // Voprosy atomn. nauki i tekhniki [Nuclear issues. science and technology]. Seriya: Vakuum, chistye materialy, sverhprovodniki. – 2006. No.1. S. 145–152. [in Russian]
18. Huang A., Hu D., Xinhua WuLoretto, M.H. The Influence of Interrupted Cooling on the Massive Transformation in Ti₄₆Al₈Nb // Intermetallics. – 2007. – 144 p.
19. Kolachyov, B. A. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka cvetnyh metallov i splavov [Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys]: ucheb. dlya vuzov / A. B. Kolachyov, V. I. Elagin, V. A. Livanov. – Moskva, – 2005. – 432 s. [in Russian]
20. Effect of interface behavior between particles on properties of pure Al powder compacts by spark plasma sintering [Text] / G. Xie, O. Ohashi, T. Yoshioka, M. Song, K.Mitsuishi, H. Yasuda, K. Furuya, T. Noda // Materials Transactions. – 2001. – 42 p. [in Russian]
21. Toshio M. Effects of unidirectional solidification conditions on the microstructure and tensile properties of [Ni]₃Al / M. Toshio, H. Toshiyuki // Intermetallics. – 1995. P. 23–33
22. Barinov V.YU., Rogachev A.S., Vadchenko S.G., Moskovskih D.O., Kolobov YU.R. Iskrovoe plazmennoe spekanie [Spark plasma sintering] – 2018. – 224 s. [in Russian]
23. Kolachyov B.A. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka cvetnyh metallov i splavov [Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys]: ucheb. dlya vuzov / A.B. Kolachyov, V. I. Elagin, V. A. Livanov. – Moskva MISiS, – 2005. – 432 s. [in Russian]
24. Groza J.R, Nanostructures bulk solids by field activated sintering / J.R. Groza, A. Zavaliangos // Reviews on advanced materials science. – 2003. P. 24–32.
25. Tokita M. Trends in Advanced SPS (Spark Plasma Sintering) Systems and Technology / M. Tokita // Journal of the Society of Powder Technology. – 1993. P. 790–804.
26. Slavyanov N.G. Trudy i izobreteniya [Works and inventions] / N.G. Slavyanov. – Perm: Kn. izd-vo, 1988. – 296 s. [in Russian]
27. Fridman S.R., Risovany V.D. Zakharov A.V., Toropova V.G. Radiation stability of WWER-1000 CPS AR absorber element with boron carbide // VANT. S: Physics of radiation

damages and radiation science of materials. 2001. P. 84–90.

28. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering [Text] / R. Orru, R. Licheri, A. M. Locci, A. Cincotti, G. Cao // *Materials Science and Engineering: – 2009. P. 127–287.*

29. Munir Z.A. Synthesis and densification of nanomaterials by mechanical and field activation / Z.A. Munir // *Journal of Materials Synthesis and Processing. – 2000. P. 189–196.*

30. Lee J.W. Dense nanocrystalline TiB₂-TiC composites formed by field activation from high-energy ball milled reactants / J.W. Lee, Z.A. Munir, M. Ohyanagi // *Materials Science and Engineering: – 2002. P. 221–227.*

31. Omori M. Sintering, consolidation, reaction and crystal growth by the spark plasma system (SPS) / M. Omori // *Materials Science and Engineering: – 2000. P. 183–188.*

32. Microstructures and mechanical properties of TiAl alloys consolidated by spark plasma sintering / A. Couret, G. Molénat, J. Galy, M. Thomas // *Intermetallics. – 2008. P. 1134–1141.*

33. Effect of surface oxide films on the properties of pulse electric-current sintered metal powders / G. Xie, O. Ohashi, N. Yamaguchi, A. Wang // *Metallurgical and Materials Transactions A. – 2003. 2655–2661 p.*

34. Tokita, M. Trends in Advanced SPS (Spark Plasma Sintering) Systems and Technology / M. Tokita // *Journal of the Society of Powder Technology. – 1993. P. 790–804*

35. Synthesis of bulk FeAl nanostructured materials by HVOF spray forming and Spark Plasma Sintering / T. Grosdidier, G. Ji, F. Bernard, E. Gaffet, Z.A. Munir, S. Launois // *Intermetallics. – 2006. – Vol.14. – P. 1208–1213.*

36. Spark Plasma Sintering of nanoscale (Ni+Al) powder mixture [Text] / J.S. Kim, H.S. Choi, D. Dudina, J.K. Lee, Y.S. Kwon // *Solid State Phenomena. – 2007. P. 35–38.*

37. Mamedov V. Spark plasma sintering as advanced PM Sintering method [Text] / V. Mamedov // *Powder Metallurgy. – 2002. P. 322–328.*

38. Boldin M.S. Fizicheskie osnovy tekhnologii elektropulsnogo plazmennogo spekaniya [Physical fundamentals of electro-pulse plasma sintering technology] / M.S. Boldin. – ucheb.-metod. posobie Nizhegorod. gos. un-t. – Nizhnij Novgorod, 2012. – 59 s. [in Russian]

39. Annenkov Yuriy Mihajlovich, Akarachkin Sergej Anatolevich i Ivashutenko Aleksandr Sergeevich // Fizicheskaya model iskrovogo plazmennogo spekaniya keramiki [Physical model of spark plasma sintering of ceramics]. – 2012. S. 1–2. [in Russian]

40. Eremeeva ZH.V., Myakisheva L.V., Panov V.S. // Skrovoe plazmennoe spekanie i goryachee pressovanie zagotovok iz karbida bora, poluchennogo razlichnymi metodami [Spark plasma sintering and hot pressing of boron carbide blanks obtained by various methods] – M. // «MISiS» – 2018. [in Russian]

41. Shevcova L.I. Struktura i mekhanicheskie svojstva intermetallida ni₃ al, poluchennogo po tekhnologii iskrovogo plazmennogo spekaniya mekhanicheski aktivirovannoj poroshkovej smesi «Ni–Al» // – 2014. – 12 s. [in Russian]

42. SHEvcova L.I., Ivanchik I.S., Volkov D.S., Nemolochnov D.A. // – 2019. S. 21–27 [in Russian]

43. Huang Y.D. Effect of thermomechanical processes on room-temperature mechanical properties of Fe₃Al-based alloys / Y.D. Huang, W.Y. Yang, Z.Q. Sun // *Journal of Materials Science Letters. – 1998. P. 1781–1784.*

44. Bataev I.A., Mali V.I., Anisimov A.G. Vliyanie temperatury nagreva na strukturu i mekhanicheskie svojstva materiala, poluchennogo iskrovym plazmennym spekaniem poroshka PN85YU15 [Influence of the heating temperature on the structure and mechanical properties of the material obtained by spark plasma sintering of PN85Y15 powder] // – Minsk: Belaruskaya navuka – 2013. – 36 s. [in Russian]

45. Kolpakov M. E., Dresvyannikov A.F., Doronin V.N. // Rezultaty issledovaniya obemnyh obrazcov sistemy Al-Fe-Co, poluchennyh sps-metodom [Results of the study of volumetric samples

of the Al-Fe-Co system obtained by the sps method]. – 2013. – 321 s. [in Russian]

46. Shuleshova T.G., Woodcock H.-G., et al. Metastable Phase Formation in Ti-Al-Nb Undercooled Melts // Acta Materialia. – 2007. P. 681–689.

47. Kolpakov M.E., Dresvyannikov A.F., Doronin V.N. Iskrovoe plazmennoe spekanie prekursora na osnove elementnyh Fe, Co, Al [Spark plasma sintering of a precursor based on elemental Fe, Co, Al] – 2011. S. 1–2 [in Russian]

48. Kolpakov M.E. Obrazovanie metallicheskih osadkov na suspenzionnom alyuminievom elektrode v vodnyh rastvorah zheleza (III) i kobalta (II) [Formation of metallic precipitates on a suspension aluminum electrode in aqueous solutions of iron (III) and cobalt (II)] / M.E. Kolpakov, A.F. Dresvyannikov // Vestnik Kazan. tekhnol. un-ta. – 2011. S. 173–178 [in Russian]

49. Karakozov B.K., Kurbanbekov SH. R., Sitnikov A., Baklanov V.V, Skakov // M.K. Issledovanie strukturno-fazovogo sostoyaniya splava Ti_{23.5}at.%Al-21at.%Nb, poluchennogo metodom iskroplazmennogo spekaniya [Investigation of the structural-phase state of the Ti_{23.5}at.%Al-21at alloy.%Nb obtained by microplasma sintering] / – Minsk: Belaruskaya navuka, – 2017. S. 462–469 [in Russian]