



ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ІС
ИНЖЕНЕРИЯ И ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО
ENGINEERING AND ENGINEERING

МАТЕРИАЛТАНУ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
MATERIALS SCIENCE

DOI 10.51885/1561-4212_2024_4_57
MFTAA 81.09.06

Ш.Р. Қурбанбеков¹, Е.Е. Табиева², А.С. Қизатов², Н.П. Мұсахан¹, Ю.О. Амангельдиева¹

¹Х.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан

E-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

E-mail: nurken.mussakhan@ayu.edu.kz

E-mail: yulduz.amangeldieva12345@mail.ru

²Д. Серікбаев атындағы атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,

Өскемен қ., Қазақстан

E-mail: etabieva@edu.ektu.kz*

E-mail: akizatov@edu.ektu.kz

ПРАКТИКАЛЫҚ МАҚСАТТА ҚОЛДАНЫЛАТЫН ФУНКЦИОНАЛДЫ МАТЕРИАЛДАРДЫ ҰШҚЫН ПЛАЗМАЛЫҚ АГЛОМЕРАЦИЯЛАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫНА ҚЫСҚАША ШОЛУ

КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРАКТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

A BRIEF OVERVIEW OF THE TECHNOLOGY OF SPARK PLASMA SINTERING OF FUNCTIONAL MATERIALS FOR PRACTICAL PURPOSE

Аңдатпа. Шолу мақаласы функционалдық материалдарды, атап айтқанда интерметалдық қосылыстарды өндіру үшін ұшқын плазмасын агломерациялау технологиясын зерттеуге арналған. Бұл материалдар авиация, ғарыш техникасы, энергетика және басқа да жоғары технологиялық салаларда маңызды рөл атқарады. Ұшқын плазмалық агломерация әдісі жоғары тиімділікпен ерекшеленеді және жоғары тығыздық, беріктік, ыстыққа төзімділік және коррозияға төзімділік сияқты ерекше қасиеттерге ие материалдарды шығаруға мүмкіндік береді. Мақалада агломерация процесінің барлық кезеңдері, ұнтақтарды дайындаудан бастап соңғы өңдеуге дейін, сондай-ақ температура, қысым, ұстау уақыты және импульстардың жиілігі сияқты негізгі технологиялық параметрлер қарастырылады. Бұл параметрлерді мұқият оңтайландыру құрылымның жоғары біркелкілігі мен минималды кеуектілігіне қол жеткізуге мүмкіндік беретіні атап өтіледі, бұл материалдардың пайдалану қасиеттерін едәуір жақсартады және оларды сенімді әрі ұзақ мерзімді етеді. Жылудың локализацияланған бөлінуін қамтамасыз етіп, диффузиялық процестерді жеделдету арқылы өңдеу уақытын қысқартуға және өнімділікті арттыруға ықпал ететін Джоульдік жылу бөлу механизмі сипатталады. Мақалада металдар мен күрделі композицияларды өңдеу үшін ұшқын плазмалық агломерацияны қолданудың сәтті мысалдары бұл әдісті ерекше қасиеттері бар материалдарды жасауға арналған әмбебап құрал етеді. Сондай-ақ, технологияны жетілдіруге бағытталған ағымдағы зерттеулер мен әзірлемелер, процестің параметрлерін басқарудың жаңа тәсілдерін қоса алғанда тиімділікті арттыру үшін инновациялық материалдарды пайдалану талқыланады. Ұшқын плазмалық агломерацияның өнеркәсіпте қолданылу перспективалары, жоғары температура мен жүктеме жағдайында жұмыс жасайтын сұранысқа ие жаңа типтегі конструкциялық материалдарды жасау мүмкіндігін қарастырады. Осылайша, шолу мақалада ұшқын плазмалық агломерация саласындағы жүргізілетін зерттеулердің маңыздылығы, қолдану аясын кеңейту мен процестің экономикалық тиімділігін арттырып, отандық материалтану саласының қарқынды дамуына үлес қосуға мүмкіндік беретіні анықталады.

Түйін сөздер: Интерметаллидтер, ұшқын плазмалық агломерация, материалдар, микроқұрылым, джоуль жылыту, коррозияға төзімділік.

Аннотация. Обзорная статья посвящена изучению технологии искрового плазменного спекания для получения материалов функционального назначения, в частности интерметаллидов. Эти материалы играют важную роль в авиации, космической технике, энергетике и других высокотехнологичных отраслях. Метод искрового плазменного спекания отличается высокой эффективностью и позволяет производить материалы с особыми свойствами, такими как высокая плотность, прочность, термостойкость и коррозионная стойкость. В статье рассматриваются все этапы процесса агломерации, от подготовки порошков до окончательной обработки, а также основные технологические параметры, такие как температура, давление, время выдержки и частота импульсов. Отмечается, что тщательная оптимизация этих параметров позволяет добиться высокой однородности и минимальной пористости структуры, что значительно улучшает эксплуатационные свойства материалов и делает их более надежными и долговечными. Описан механизм Джоулевого тепловыделения, который обеспечивает локализованное выделение тепла и способствует сокращению времени обработки и повышению производительности за счет ускорения диффузионных процессов. Удачные примеры применения искрового плазменного спекания для обработки металлов и сложных композиций в статье делают этот метод универсальным инструментом для изготовления материалов с особыми свойствами. Также обсуждаются текущие исследования и разработки, направленные на совершенствование технологии, использование инновационных материалов для повышения эффективности, включая новые подходы к управлению параметрами процесса. Перспективы применения искрового плазменного спекания в промышленности предусматривают возможность создания востребованных конструкционных материалов нового типа, работающих в условиях высокой температуры и нагрузки. Таким образом, в обзорной статье определена значимость проводимых исследований в области искровой плазменной агломерации, что позволит расширить сферу применения и повысить экономическую эффективность процесса, внести вклад в развитие отечественной материаловедческой отрасли.

Ключевые слова: Интерметаллиды, искровое плазменное спекание, материалы, микроструктура, джоулев нагрев, коррозионная стойкость.

Abstract. The review article explores the use of spark plasma sintering technology to produce intermetallics. These materials play an important role in aviation, space engineering, energy, and other high-tech industries. The spark plasma sintering method is characterized by high efficiency and allows you to produce materials with special properties such as high density, strength, heat resistance, and corrosion resistance. The article discusses all stages of the sintering process, from the preparation of powders to the final processing, as well as the main technological parameters, such as temperature, pressure, holding time, and pulse frequency. Careful optimization of these parameters enables the achievement of high uniformity and minimal porosity in the structure, thereby significantly enhancing the operational properties of materials and enhancing their reliability and durability. The Joule heat dissipation mechanism is characterized, which contributes to reducing processing time and increasing productivity by providing localized heat dissipation and accelerating diffusion processes. In the article, successful examples of the use of spark plasma sintering for processing metals and complex compositions make this method a universal tool for creating materials with unique properties. It will also discuss current research and development aimed at improving technology and the use of innovative materials to improve efficiency, including new approaches to managing process parameters. Prospects for the application of spark plasma sintering in industry include the potential to create a new type of construction material that is in demand and can operate in conditions of high temperature and load. In this way, the review article shows how important it is to do research in the area of spark plasma sintering, which helps the fast growth of the domestic materials science industry by expanding the process's uses and making it more cost-effective.

Keywords: Intermetallic compounds, spark plasma sintering, materials, microstructure, Joule heating, corrosion resistance.

Қысқашы. Оңтайландырылған микроқұрылымы бар, тығыздығы теориялық мәніне жуық, беріктігі мен эксплуатациялық сипаттамалары жоғары материалға деген қажеттілік материалдарды алудың дәстүрлі әдістерін жетілдіруге немесе жаңа бағыттағы технологиялық шешімдер табуға әкелуде. Осындай қасиетке ие қосылыстардың бірі – қазіргі таңда әлемдік ғылыми кеңістіктің қызығушылығын тудырып, назарын аударып отырған интерметаллидтік қосылыстар. Олардың бірегей физика-химиялық қасиеттері оларды авиация, ғарыштық техника, электроника және энергетика сияқты әртүрлі жоғары технологиялық салаларда қолдану мүмкіндігі үшін құнды етеді. Интерметаллидтік материалдардың негізгі сипаттамаларына жоғары беріктік, жоғары қаттылық, ыстыққа және коррозияға жоғары төзімділік болып табылады (Yartys et al., 2022).

Мұндай қосылыстарды алуға мүмкіндік беретін технологиялардың бірден-бірі ұшқын

плазмалық агломерациясы (SPS) болып табылады. Жоғары температура мен қысымға ұшыраған кезде электрлік ынталандырылған агломерациядан тұратын ұшқынды плазмалық агломерация әдісі, әдетте, дәндердің іріленуін болдырмай, теориялық есептелгенге жақын тығыздық мәндері бар материалдарды алуға мүмкіндік беруімен ерекшеленеді. Осы жұмыстағы сипатталған SPS әдісі металдар, металлидтер, оксидтер және т.б. композиттердің тығыз шоғырланған үлгілерін алуға, соның ішінде интерметаллидтік қосылыстарды алуға бағытталған.

Ұшқын плазмалық агломерация (SPS) – жоғары өнімділік сипаттамалары бар, бірегей функционалдық мақсатта қолданылатын, озық, жаңа материалдар жасау саласындағы актуалды технологиялардың бірі. Оның негізгі тұжырымдамасы ұнтақ металлургиясының дәстүрлі әдістерімен бұрын қол жеткізілмеген ұнтақ материалдарын өңдеудің (консолидация/агломерация) инновациялық механизмдерін жүзеге асырудан тұрады. Технологияның артықшылығы мен ерекшеліктерінің бірі – механикалық жүктеме кезінде электрлік импульстік қыздыру есебінен шектеусіз химиялық және фракциялық құрамдағы дисперсті материалдарды жоғары жылдамдықпен біріктіруінде.

SPS технологиясына іргелі сипаттама жасайтын термофизикалық және электрофизикалық әсерлердің тұтас қабаттасуымен және механикалық әсерлесуге байланысты бүкіл үрдіс бойы жүретін физикалық көрінісінің ерекше күрделілігіне байланысты қазіргі күнге дейін біржақты негіздемесі қалыптасып үлгермеді (Cao et al., 2019; Nisar et al., 2021). Дегенмен, осыған қарамастан SPS үрдісінде пайда болатын физикалық құбылыстардың жиынтығы, мысалы, Джоуль-Ленц жылу генерациясы, электромиграция, электропластика, пондеромоторлық күштер, перколяция эффектісі, «пинч» эффектісі, Пельтье эффектісі, поляризация, корреляциялық әсерлер, фазааралық реакциялар, атомдардың диффузиясы және басқа да әсерлер зерттеушілерге алынған материалдардың құрамы мен құрылымдық архитектурасын өзгертуге мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, SPS-тің дәстүрлі әдістерге қарағанда технологиялық артықшылығы синтездің салыстырмалы төмен температурасы (орта есеппен 300 °C төмен), жоғары қыздыру (орташа 150-200°C/мин) және салқындату (400°C/мин) жылдамдықтары, термиялық ұстаудың қысқа уақыты (минут), агломерациялау және престеуді бір мезетте жүзеге асыру (бір сатылы), пісіретін қосымша қоспаларды қажет етпеуі және материалдың максималды тығыздығына жету мүмкіндігі (теориялық мәніне 100 % жету мүмкіндігі).

SPS өрісті агломерациялау (FAST/SPS) деп те аталып, қазіргі ұнтақ металлургиясы мен керамикалық технологиядағы материалдарды өңдеудің ең прогрессивті әдістерінің бірі болып отыр (Fu et al., 2019; Cramer et al., 2020; Weston et al., 2019). Бұл әдіс ұнтақты материалдың тез және біркелкі қызуына ықпал ететін, жоғары қарқынды электрлік импульстарды қолдану арқылы агломерация уақытын едәуір қысқартуға және алынған материалдардың сапасын арттыруға мүмкіндік береді.

Шолу. Ұшқын-плазмалық агломерация технологиясы XX ғасырдың ортасында белсенді дами бастады, дегенмен бұл әдістемеді қолданылатын электр тогымен тікелей қыздыру принциптері XIX ғасырда белгілі болды (Munir et al., 2006; Orrù et al., 2009). SPS-ті коммерциялық қолдану Жапония мен Германиядан бастау алып, әдісті қолдану аясын едәуір кеңейтуге мүмкіндік беретін арнайы жабдық жасалды (Grasso et al., 2009). SPS-тің дәстүрлі агломерация әдістерінен басты айырмашылығы – материалды жоғары қыздыру және агломерация жылдамдығын қамтамасыз ететін тікелей джоульдік жылытуды қолдану (Conrad et al., 2009).

Дәстүрлі әдістермен салыстырғанда SPS әдісінің негізгі артықшылықтарының бірі төмен температурада материалдарды тез тығыздау мүмкіндігі болып табылады. Бұл тығыздығы жоғары, кеуектілігі төмен және механикалық қасиеттері жақсартылған материалдарды алуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, SPS қиын балқитын металдар,

интерметаллидтер және композиттер сияқты басқа әдістермен агломерациялау қиын материалдармен жұмыс істеуге мүмкіндік береді. Мысалы, SPS қатты қорытпаларды, соның ішінде биомедициналық қолдану үшін керамикалық материалдарды жасау үшін, сондай-ақ бірегей магниттік және электрлік қасиеттері бар материалдарды алу үшін белсенді қолданылады. Соңғы жылдары функционалдық материалдар мен құрылғылар саласында жаңа перспективаларды ашатын нанокұрылымды материалдар өндірісінде SPS қолдануына да үлкен қызығушылық байқалды.

SPS-тегі қыздыру механизмі материал арқылы электр тогы өткен кезде пайда болатын Джоульдік қыздыру құбылысына негізделген. Ток ұнтақтардың жанасу беттерінен өткенде, ол кедергі мен ток күшінің квадратына пропорционалды жылу шығарады. Пештердегі агломерация сияқты дәстүрлі агломерация әдістерінен айырмашылығы, SPS кезінде қыздыру тікелей материалдың ішінде жүреді, бұл температураның локализацияланған жоғарылауына әкеледі. Бұл тіпті, отқа төзімді материалдардың тез қызуына және агломерациясына ықпал етіп, жылудың біркелкі таралуын қамтамасыз етіп, жылу градиенттерін азайтады. SPS-дегі Джоульдік жылытудың негізгі артықшылықтары: жоғары қыздыру және салқындату жылдамдығы мен локальдік жылыту. Бұл өз кезегінде, дәндердің өсуін азайтып, микроқұрылымды басқаруға мүмкіндік береді.

Диффузиялық процестер ұшқын-плазмалық агломерацияда ұнтақтарды тығыздауда шешуші рөл атқарады. Олар ұнтақтың жеке бөлшектерін біріктіру және қатты матрицаны қалыптастыру үшін қажетті атомдардың қозғалысын қамтамасыз етеді. SPS процесінде диффузияның екі негізгі түрі бар. Біріншісі, микро-бұдырлардың тегістелуі мен агломерацияның бастапқы сатысына ықпал ететін – атомдар бөлшектердің бетімен қозғалатын беттік диффузия. Бұл процесс салыстырмалы түрде төмен температурада жүреді және айтарлықтай тығыздауға ықпал етпейді. Екіншісі, атомдар бөлшектер көлемінен қозғалатын көлемдік диффузия – негізгі тығыздауды және күшті бөлшектер арасындағы байланыстардың түзілуін қамтамасыз ететін диффузия. Көлемдік диффузия температураның жоғарылауымен белсеніп, атомдардың қозғалуына энергетикалық тосқауылдың айтарлықтай төмендеуін көрсетеді. Сонымен қатар, SPS процесі белсенді ақаулардың пайда болуына және диффузиялық процестердің жоғарылауына ықпал ететін плазмалық әсерді қамтуы мүмкін.

Ұшқын-плазмалық агломерация процесі алынған материалдың соңғы құрылымы мен қасиеттеріне байланысты бірқатар параметрлермен сипатталады. Температура диффузиялық процестердің белсендіру деңгейін анықтайды. Жоғары температура материалдың жоғары тығыздығы мен беріктігін қамтамасыз ете отырып, қарқынды көлемдік диффузияға ықпал етеді. Алайда температураның шамадан тыс жоғарылауы дәндердің өсуіне әкелуі мүмкін, бұл механикалық қасиеттерді төмендетеді. Сыртқы қысым бөлшектердің тығыз орналасуына және кеуектіліктің төмендеуіне ықпал етеді. Ол сондай-ақ бөлшектер арасындағы байланысты күшейтеді, Джоуль жылыту тиімділігін арттырады және агломерация уақытын қысқартады. Импульстардың ұзақтығы материалға жылу әсерінің ұзақтығына әсер етеді. Импульстардың ұзақтығы мен жиілігінің оңтайлы үйлесімі микроқұрылымдық бақылаудың минималды жоғалуымен максималды тығыздыққа қол жеткізуге мүмкіндік береді. Импульстік жиілік қыздыру және салқындату процесін басқаруға мүмкіндік береді, бұл температураның престоу көлеміне біркелкі таралуын қамтамасыз етеді. Импульстік жиілікті ұсақ түйіршікті құрылымды сақтай отырып, диффузияны барынша арттыру үшін реттеуге болады.

Зерттеулер көрсеткендей, температура, қысым, импульс ұзақтығы және жиілік сияқты SPS параметрлері материалдардың соңғы қасиеттеріне айтарлықтай әсер етеді. Мысалы, температура мен қысымның жоғарылауы материалдың тығыздығы мен механикалық

қасиеттерін жақсартады, бірақ сонымен бірге жағымсыз фазалық өзгерістерге әкелуі мүмкін. Осы жағынан SPS параметрлерін модельдеу мен оңтайландыру жолындағы жұмыстар соңғы өнімдегі ықтимал ақауларды болдырмау үшін маңызды болып табылады.

Құрылғының жабдықталуы SPS үрдісінде маңызды рөл атқарады, өйткені ол біркелкі қыздыруды қамтамасыз етуі және жоғары температура мен механикалық кернеуге төтеп беруі керек. Ең жиі қолданылатын материал графит болып табылады бұл оның жоғары ыстыққа төзімділігі мен электр өткізгіштігіне байланысты. Дегенмен, белгілі бір жағдайларда жақсартылған өнімділікті ұсына алатын керамика, металл қорытпалары және композиттер сияқты балама материалдар да зерттелуде.

Зерттеудің негізгі бағыттарының бірі ұшқын плазмасын агломерациялаудың температура, қысым және ұстау уақыты сияқты параметрлерінің интерметаллидтердің қасиеттеріне әсерін зерттеу болып табылады (Chen et al., 2019). Иванов және т.б (Иванов., 2023).жұмыстарына сәйкес, агломерациялау параметрлерін дұрыс таңдау жоғары тығыздықтағы және минималды кеуектері бар материалдарды алуға мүмкіндік береді, бұл олардың өнімділік сипаттамаларын айтарлықтай арттырады.

Ұнтақты металлургия және SPS технологиясы саласындағы мамандарды тиімді дайындау осы технологияны табысты енгізу және дамыту үшін өте маңызды. Бүгінгі таңда материалтану саласында ғана емес, сонымен қатар ұшқын плазмасын агломерациялау технологиясы бойынша білімі бар мамандарға аса қажеттілік бар. Соңғы жылдардағы еңбектерде теориялық дайындықты да, материалдарды синтездеудің заманауи әдістері туралы практикалық білімді де қамтитын оқытудың пәнаралық қатынасының маңыздылығы атап өтілді (Smith et al., 2019).

Бұл шолуда осы мәселелерді шешу тәжірибесі жинақталған, сонымен қатар SPS технологиясының табыстылығы үшін құралдарды ұтымды жобалау және пайдалану перспективалары талқыланады.

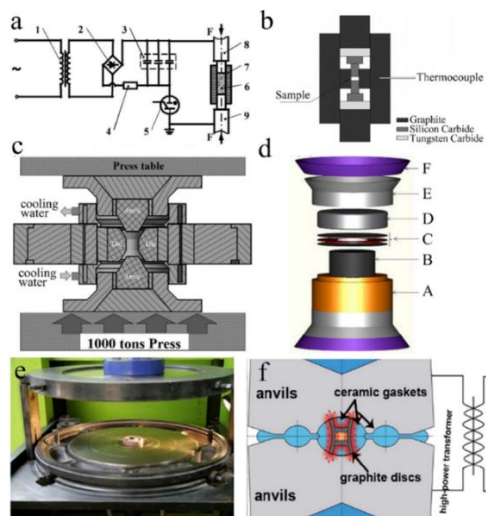
SPS, сондай-ақ импульстік электр тоғымен агломерация (PECS) немесе электр өрісін агломерациялау технологиясы (FAST) ретінде белгілі, ұнтақ металлургиясының әдістері болып табылады. SPS – ұнтақ композицияларды біріктірудің инновациялық технологиясы (Jiang et al., 2006; Ramanujan et al., 1996; Sharma et al., 2000). Бұл үрдіс ұнтақты біріктірудің бірнеше технологиялық кезеңдерін біріктіреді (Hu et al., 2020; Chu et al., 1991). SPS технологиясын жүзеге асырудағы қондырғының жалпы көрінісі (Сур.1а), жоғары қысымды фильердің схемалық көрінісі (1, b-сурет), үлгіні жүктеуге арналған жоғары қысымды пресс (1, c-сурет), қондырғыдағы жоғары қысымды престің диаграммасы (Сур.1d), Бриджмен пресінің фотосуреті (Сур.1e) және «HP-SPS-Bridgman» компоненттерінің схемалық сызбасы (Сур.1f) келтірілген.

Бұл техниканың негізгі принциптері 50 жылдан астам уақыт бұрын ұсынылғанына карамастан, SPS соңғы екі онжылдықта ғана айтарлықтай таралып, мойындалды. Ғалымдар SPS ұнтақтардың беттік күйін, атомдық диффузия тәртібін, фазалық тұрақтылықты және агломерацияланған бөлшектердің өзара әрекеттесуін бақылауға мүмкіндік беретінін, сонымен қатар агломерациялануы қиын материалдардың нығыздалуын тездететінін біртіндеп түсінді. Ұнтақтар мен бір-біріне ұқсамайтын материалдарды біріктіру құралы ретінде SPS әдісінің танымалдылығының артуы соңғы жылдары шығарылған көптеген, әсіресе шетелдік басылымдармен расталады.

Ұзақ мерзімді және жоғары температуралық термиялық өңдеумен сипатталатын қысымсыз агломерация, ыстық престеу және ыстық изостатикалық престеу сияқты дәстүрлі ұнтақ металлургия әдістерімен салыстырғанда, SPS технологиясы әлдеқайда жылдамырақ, өйткені жылу тікелей электротермиялық әсер және пеш камерасына емес, тек «пуансон-сынама үлгі» жүйесінде таратылады.

Зерттеушілердің пікірінше, ұнтақ металлургиядағы дәстүрлі біріктіру әдістеріне

қарағанда SPS технологиясының негізгі артықшылықтары төмендегідей (Fang et al., 2015; Скаков, 2017).



1-сурет. SPS технологиясы сұлбасы және қондырғының жалпы көрінісі
Ескерту – авторлар (Курбанбеков Ш.Р, 2017) мақаласы негізінде құрастырған

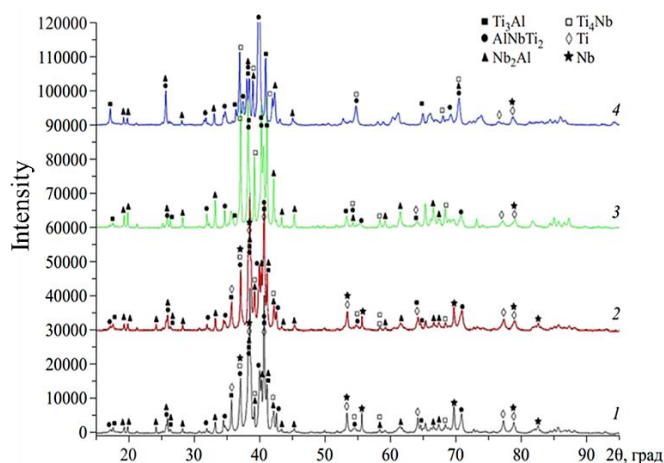
Жоғары қыздыру жылдамдығы: қыздыру жылдамдығы түпнұсқа ұнтақтарына, матрица түрі мен өлшеміне және жабдықтың өнімділігіне байланысты болса да, IPS қондырғыларының көпшілігі 1000 °C/мин температураға дейін жетуге қабілетті (Kurbanbekov et al., 2017). Бұл жоғары қыздыру жылдамдығына байланысты агломерацияның бастапқы кезеңдерінде дән мөлшерін тиімді бақылауға мүмкіндік береді (Karakozov et al., 2018). Зерттеуде салыстырмалы тығыздығы 99,1 % және дәннің орташа диаметрі 50 нм болатын жоғары таза MgO керамика ультра жоғары қыздыру жылдамдығын (1300 °C/мин) пайдалана отырып, 1350 °C температурада дайындалды. Авторлар нығыздау процесінде бөлшектердің іріленуі іс жүзінде болмағанын атап өтті. Осылайша, SPS өзінің жылдамдығы мен процестің қысқа ұзақтығына байланысты ұсақ түйіршікті материалдарды консолидациялау саласындағы зерттеулердің тиімді әдісіне айналады.

Төменгі агломерация температурасы: Қазіргі зерттеулер SPS көмегімен тығыздау процесі радиациялық-кондуктивті қыздыру әдістерімен салыстырғанда күрделірек екенін көрсетеді. SPS-тегі тығыздау дән шекарасының диффузиясы және көлемді диффузия сияқты баяу механизмдерге тәуелсіз болуы мүмкін, бірақ булану-конденсация диффузиясы, беттік диффузия және балқыма диффузиясы сияқты механизмдерге немесе пластикалық деформация сияқты уақытқа тәуелсіз процестерге байланысты болуы мүмкін (Курбанбеков, 2016). Нәтижесінде, SPS процесінде шоғырлану температурасы көптеген дәстүрлі агломерациялық әдістерге қарағанда шамамен 200-300 °C төмен, бұл отқа төзімді және ыстыққа төзімді материалдарды біріктіруге мүмкіндік береді.

Қысқа экспозиция уақыты: Көптеген жағдайларда SPS көмегімен материалдардың қажетті тығыздығына жету үшін бар болғаны 15 минут қажет. Райченко және басқалардың зерттеуі бойынша, біркелкі микроқұрылымы бар Cu-50Ni композиттерін алу үшін бар болғаны 45 секунд қажет, ал дәстүрлі изотермиялық агломерация 1050 °C температурада 4 сағат ұстау уақытын қажет етеді (Каракозов, 2016). Өнімділікті арттыратын және өңдеу шығындарын азайтатын қысқа қыздыру уақыты зиянды реакциялардың немесе фазалық өзгерістердің пайда болуына жол бермейді. Осы тұрғыда SPS әртүрлі материалдарды, соның

ішінде қиын агломерацияланатын материалдарды, көміртегі негізіндегі жаңа материалдарды, сусымалы нанокристалды металдарды, функционалды разрядталған материалдар мен күрделі пішінді бұйымдарды өндіруге, сондай-ақ ұқсас емес материалдарды жылдам біріктіруге оңтайлы (Kozhahmetov et al., 2017; Тарасов, 2003; Казанцева, 2006).

Ұшқын плазмалық агломерация арқылы алынған қорытпалар. Титан негізіндегі интерметалдық қосылыстарды кешенді материалтану зерттеулері барысында Ti + 23,5 ат. % Al + 21 ат. % Nb ұнтақ қоспаларын ұшқынды-плазмалық агломерациялау арқылы алынған қорытпалардың фазалық құрамына талдаулар жүргізілді (Каракозов, 2018). Нәтижелер агломерациялық материалдарда α_2 , Nb₂Al, Ti₄Nb интерметалдық қосылыстардың болатынын, сондай-ақ Ti және Nb металдарының қалдық мөлшері мен О-фазасы (2-сурет) түзілгенін көрсетті. Агломерация температурасы 1100-ден 1550 °C-қа дейін жоғарылағанда, қорытпадағы О фазасының мөлшері 25-тен 47-ге (мас. %) дейін артып, ал бос (реакцияланбаған) титан мен ниобий мөлшері 4 масс.% дейін азаяды. Агломерацияланған қорытпалардың микроқұрылымы 1100 және 1200 °C-та біртекті емес сипатқа ие. Металлографиялық талдау көрсеткендей, бұл қорытпалар α_2 фазалық түйіршіктерден, Nb₂Al және дисперсті О фазалық бөлінулерінен, сонымен қатар ниобий мен титанның реакцияға түспеген бөлшектерінен тұрады. Агломерация температурасын 1300 °C-қа дейін арттырғанда, қорытпалар ламельді микроқұрылымға ие болады. Элементтердің таралу карталары агломерация температурасының жоғарылауы қорытпалардың біркелкі микроқұрылымының қалыптасуына ықпал ететінін көрсетеді.



2-сурет. 1100 °C (1), 1200 °C (2), 1300 °C (3), 1550 °C (4) температурада Ti-23.5 ат.%Al-21 ат.%Nb ұнтақ қоспаларын электр ұшқынымен агломерациялау арқылы алынған қорытпаларының дифрактограммалары

Ескерту – авторлар (Каракозов Б.К, 2018) мақаласы негізінде құрастырған

SPS әдісі жоғары өнімді Ti-48Al-2Cr-2Nb қорытпасын (BMP ұнтағы) жасау үшін сфералық алдын ала легірілген ұнтақ (SSP ұнтағы) және шарлы ұнтақтарды нығыздау үшін пайдаланылды. Ван және басқалары (Wang et al., 2019) осы зерттеуде әртүрлі агломерациялық температуралардағы микроқұрылымдағы, тығыздықтағы және механикалық қасиеттердегі айырмашылықтарды зерттеді. SSP және BMP ұнтақтардың екі түрі үшін TiAl₂ және TiAl₃ фазаларын қосу арқылы ұқсас фазалар (α_2 -Ti₃Al, γ -TiAl) алынды. Сонымен қатар, шарикті диірменде ұнтақ ұнтақталған Ti₂Al фазасы анықталды. Авторлар γ -TiAl, TiAl₃ және TiAl₂ 1200 °C-тан 1350 °C-қа дейінгі агломерациялық температурада алды. Осыған ұқсас жұмыста Денг және басқалары (Deng et al., 2019) криомолдинг пен SPS көмегімен Ti-45Al-8Nb қорытпаларын алудың бірегей әдісін көрсетті. Skiba және

басқалары (Skiba et al., 2010) FeAl интерметалл қосылыстарының SPS-ге агломерация температурасы мен қыздыру жылдамдығының өзгеруін зерттеді. Олар агломерация температурасы 1100 °C және қыздыру жылдамдығы 400 °C/мин дейін оңтайлы жағдай деген қорытындыға келді. Куге және басқалары (Appel et al., 2016) алдын ала легірілген $Ti_{49}Al_{47}Cr_2Nb_2$ және $Ti_{51}Al_{44}Cr_2Nb_2B_1$ ұнтақтарын 1100 °C-тан 1250 °C-қа дейінгі температурада тығыздау үшін SPS әдістерін қолданды. Олар 30 минуттан аспайтын қысқа мерзімде толық нығыздауға қол жеткізді және бөлме температурасында және 700 °C температурада перспективті созылу қасиеттері барын анықтады.

(Shongwe et al., 2015) жұмыстарында SPS әдісімен алынған агломерленген Fe-30 % Ni екілік қорытпасы зерттелді. Микроқұрылымды және механикалық қасиеттерді сипаттағаннан кейін авторлар материал тығыздығының артуы агломерация температурасымен байланысты деген қорытындыға келді (агломерация температурасының жоғарылауы материал тығыздығының жоғарылауына әкелді). Қорытпаның агломерация температурасының жоғарылауымен түйір мөлшерінің ұлғаюы да байқалды. Осылайша, ең жоғары температурада (1230 °C) агломерацияланған қорытпаның орташа түйіршік мөлшері агломерациялаудың ең төменгі температурасында (950 °C) байқалған орташа түйіршік өлшемінен екі есе көп болды. Агломерация температурасы кеуектілікке де қатысты болды және қорытпаның кеуектілігі оның жоғарылауымен төмендейтіні анықталды. Тиісінше, агломерация температурасының жоғарылауымен қорытпаның механикалық қасиеттерінің жақсаруы байқалды. Өз зерттеулерінде Чжан және әріптестері (Zhang et al., 2009) Inconel 625 қорытпасын жасау үшін SPS пайдаланды және SPS арқылы агломерленген Inconel 625 қорытпасының механикалық қасиеттері жақсарғанын атап өтті. Материалдың өлшенген микроқаттылығы шамамен 450-500 HV құрайды, бұл ұсақ түйіршікті құрылымды сақтау арқылы материалдың беріктігі мен қаттылығын растайды. Құрылымдық талдау өңдеуден кейінгі дән мөлшері нанометрлік диапазонда (100-200 нм аралығында) тұрақты болатынын көрсетті, бұл дәстүрлі суперқорытпалармен салыстырғанда механикалық қасиеттерді жақсартады. Никель және никель қорытпаларын өндіру үшін SPS технологиясын қолдану қазіргі заманғы технологияны дамытуда табысты болды. Жоғарыда келтірілген әдебиеттер деректерінен интерметалдық қосылыстарды алу үшін SPS технологиясын қолдану табысты болып шықты және қазіргі заманғы технологияның дамуында маңызды рөл атқарды деп қорытынды жасауға болады.

Қорытынды. Бұл шолу жұмысында осы уақытқа дейін ашық көздерде жарияланған ғылыми әдебиеттердегі SPS технологиясы, оның қолданылуы мен осы технология көмегімен алуға болатын бірегей қасиетке ие интерметаллидтік қосылыстар талқыланып, келесідей қорытынды жасалды:

- Бұл әдіс энергия тығыздығын тамаша бақылау арқылы жылдам агломерациялауға мүмкіндік беретіні мен дәстүрлі агломерация тәсілдерімен қол жеткізу қиын, тығыздығы теориялық мәнге жақын біртекті наноқұрылымды, аморфты немесе функционалды материалдарды дайындауға мүмкіндік беретіні көрсетілді;

- Жоғары өнімділігі бар интерметаллидтерді алудың тиімді әдісі ретінде қызығушылық тудыратын, жаңа шешімдерді, жаңа әдіс-тәсілдерді қажет ететін ұшқын-плазмалық агломерация технологиясы практикалық зерттеулердің қажеттілігі айқындалды;

- SPS-тің дәстүрлі әдістерге қарағанда технологиялық артықшылығы синтездің салыстырмалы төмен температурасы (орта есеппен 300 °C төмен), жоғары қыздыру (орташа 150-200 °C/мин) және салқындату (400 °C/мин) жылдамдықтары, термиялық ұстаудың қысқа уақыты (минут), агломерациялау және престеуді бір мезетте жүзеге асыру (бір сатылы), пісіретін қосымша қоспаларды қажет етпеуі және материалдың максималды тығыздығына жету мүмкіндігі (теориялық мәніне 100 % жету мүмкіндігі) анықталды;

Осы сипаттамалардың арқасында SPS жоғары тығыздықтағы, жақсартылған механикалық беріктігі мен ыстыққа төзімділігі бар материалдарды алуға мүмкіндік береді, бұл оны авиация, ғарыштық инженерия және энергетика сияқты салаларда қолдануға тартымды етеді. Зерттеулер көрсеткендей, материалдардың соңғы қасиеттерін анықтайтын негізгі параметрлер температура, қысым және экспозиция уақыты болып табылады. Бұл параметрлерді оптимизациялау минималды кеуектілігі мен жоғары біркелкілігі бар интерметаллидтер өндірісінде жақсы нәтижелерге қол жеткізуге мүмкіндік береді. SPS-тің болашағы одан әрі зерттеулермен және процестерді жетілдірумен байланысты, бұл оның өнеркәсіпте қолданылуын кеңейтуге ықпал етеді. Бұл заманауи технологиялардың дамуын және олардың тиімділігін арттыруды қамтамасыз ете отырып, жоғары технологиялық салаларда сұранысқа ие болатын бірегей сипаттамалары бар жаңа материалдарды құру перспективаларын ашады. Нәтижесінде, SPS тәсілі әртүрлі өнімділігі жоғары өнеркәсіптік қолданбалар үшін перспективалы технология болып көрінеді.

Авторлардың мүдделері: Мақала авторлары авторлық мүдделер қақтығысының жоқтығын хабардар етеді.

Алғыс. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (№ BR24992925 – «Қазақстан Республикасының өңдеу өнеркәсібінің инновациялық дамуы үшін технологиялар мен материалдарды әзірлеу»).

Әдебиеттер тізімі

- Yartys V.A., Lototsky M.V. Laves type intermetallic compounds as hydrogen storage materials: a review // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – Т. 916. – С. 165219.
- Cao G. et al. (ed.). *Spark plasma sintering: current status, new developments and challenges*. – Elsevier, 2019.
- Nisar A. et al. Unconventional materials processing using spark plasma sintering // *Ceramics*. – 2021. – Т. 4. – №. 1. – P. 20-39
- Fu J., Brouwer J.C., Richardson I.M., Hermans M.J.M. Effect of mechanical alloying and spark plasma sintering on the microstructure and mechanical properties of ODS Eurofer Mater. Des., 177 (2019), Article 107849,
- Cramer C.L., McMurray J.W., Lance M.J., Lowden R.A. Reaction-bond composite synthesis of SiC-TiB₂ by spark plasma sintering/field-assisted sintering technology (SPS/FAST) J. Eur. Ceram. Soc., 40 (2020). – Pp. 988-995,
- Weston N.S., Thomas B., Jackson M. Processing metal powders via field assisted sintering technology (FAST): a critical review Mater. Sci. Technol., 35 (2019). – Pp. 1306-1328
- Munir, Z. A., Anselmi-Tamburini, U., & Ohyanagi, M. (2006). The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method. *Journal of Materials Science*, 41(3), 763-777. DOI: 10.1007/s10853-006-6555-2
- Orrù, R., Licheri, R., Locci, A. M., Cincotti, A., & Cao, G. (2009). Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 63(4), 127-287. DOI: 10.1016/j.mser.2008.09.003
- Grasso, S., Sakka, Y., & Maizza, G. (2009). Electric current activated/assisted sintering (ECAS): a review of patents 1906–2008. *Science and Technology of Advanced Materials*, 10(5), 053001.
- Conrad, H., & Johnson, L. (2009). The Spark Plasma Sintering Process: Parameters and the role of current. *Journal of Materials Science*, 44(3), 537-548. DOI: 10.1007/s10853-008-3139-z.
- Chen, H., Liu, S., & Tang, Z. (2019). Influence of sintering parameters on microstructure and properties of intermetallics synthesized by SPS. *Powder Metallurgy*, 62(2), 110-117
- Иванов, И., Петров, А., & Сидоров, В. (2023). Перспективы применения технологии искроплазменного спекания в производстве интерметаллидов. *Вестник материаловедения*, 8(1), 45-50.
- Smith, J., Doe, R., & Brown, L. (2021). Interdisciplinary education in materials science: Integrating SPS technology in curriculum. *Materials Education Journal*, 29(3), 210-220.
- Jiang H., Rong T.S., Hu D., Jones I.P., Voice W., Thermal cycling of Ti46Al8Nb1B // *Intermetallics*. – 2006. – Vol. 14, №12. – P. 1433–1447.
- Ramanujan R.V., Maziasz P.J., Liu C.T. The thermal stability of the microstructure of α -based titanium aluminides // *J. Acta Materialia*. – 1996. – Vol. 44, №7. – P. 2611–2642.
- Sharma G, Ramanujan R.V., Tiwari G.P. Instability mechanisms in lamellar microstructures // *J. Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48, №4. – P. 875–889.
- Hu Z., Zhang Z., Cheng X., Wang F., Zhang Y., Li S. A review of multi-physical fields induced phenomena and effects in spark plasma sintering: Fundamentals and applications. *Materials and Design*. – 2020. – Vol. 191. – P. 108662.
- Chu, W.Y., Thompson, A.W. Effect of hydrogen as a temporary stabilizer on microstructure and brittle fracture

- behavior in a titanium aluminide // *Metall. Trans. A.* – 1991. – Vol. 22. – P. 71-81.
- Курбанбеков Ш.Р., Скаков М.К., Каракозов Б.К., Бахтибаев А.Н. Исследование микроструктуры и свойств абсорбции-десорбции водорода сплавом на основе титана // *Вестник КазНАЕН.* – 2017. – № 3-4. – С. 68-71.
- Fang L., Lin J.P., Ding X.F., Thermal cycling induced microstructural instability in fully lamellar Ti-45Al-8.5Nb-(W, B, Y) alloys // *Materials Chemistry and Physics.* – 2015. – Vol. 167. – P. 112-118.
- Скаков М.К., Каракозов Б.К., Курбанбеков Ш.Р., Бакланов В.В., Коянбаев Е.Т. Патент на изобретение РК № 32018. Способ получения материала геттера на основе титан-алюминий-ниобий/; Рег. заявки номер 2015/1270.1; опубл. 28.04.2017, Бюл. №8.
- Kurbanbekov S., Skakov M., Baklanov V., Karakozov B. Effect of spark plasma sintering temperature on structure and phase composition of Ti-Al-Nb-based alloys // *Materialpruefung/Materials Testing.* – 2017. – Vol. 59, №11-12. – P. 1033-1036.
- Karakozov B.K., Skakov M.K., Kurbanbekov S.R., Baklanov V.V., Sitnikov A.A., Dudina D.V., Maly V.I., Yakovlev V.I., Structural and Phase Transformations in Alloys during Spark Plasma Sintering of Ti + 23.5 at % Al + 21 at % Nb Powder Mixtures // *Inorganic Materials.* – 2018. – Vol. 54, №1. – P. 37-41.
- Курбанбеков Ш.Р., Каракозов Б.К., Кожаметов, Е.А., Ситников А.А. Технология получения сплава Ti-Al-Nb методом искроплазменного спекания // V Международная научнотехническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике». – Томск: STT, 2016. – С. 104-105.
- Курбанбеков Ш.Р., Каракозов Б.К., Ситников А.А., Скаков М.К., Бакланов В.В., Яковлев В.И. Исследование влияния температуры искроплазменного спекания на микроструктуру сплава на основе Ti-Al-Nb // *Журнал Ползуновский Вестник* – 2016 – Т. 2, № 4. – С. 196-201.
- Kozhahmetov E., Karakozov B., Kurbanbekov S. Technology of Ti-Al-Nb obtaining by use of Spark plasma sintering method // *Key Engineering Materials.* – 2017. – Vol. 743. – P. 41-44. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.743.41.
- Тарасов Б.П. Металлогидридные системы обратимого хранения водорода // *Альтернативная энергетика и экология: сб. тезисов второго Международного симпозиума «Безопасность и экономика водородного транспорта».* – 2003. – С. 38-39.
- Казанцева Н.В., Сазонова В.А., Лыжина Г.А. Исследование влияния температуры отжига на дальний порядок В2-фазы в сплаве Ti-Al-Nb(Zr, Mo) // *Физика металлов и металловедение.* – 2006. – Т. 102. – № 3. – С. 310-315.
- Каракозов Б.К., Скаков М.К., Курбанбеков Ш.Р., Бакланов В.В., Ситников А.А., Дудина Д.В., Мали В.И., Яковлев В.И. Особенности сплавообразования при электроискровом спекании порошковых смесей Ti-23.5at.%Al-21at.%Nb // *Неорганические материалы.* – 2018. – Том 54 – №1. – С. 40-45
- Wang Z., et al. Effects of powder preparation and sintering temperature on properties of spark plasma sintered Ti-48Al-2Cr-8Nb alloy *Metals*, 9 (8) (2019). – P. 861.
- Deng H., et al. Bulk nanostructured Ti-45Al-8Nb alloy fabricated by cryomilling and spark plasma sintering *J. Alloy. Compd.*, 772 (2019). – Pp. 140-149
- Skiba T., Hau'sild P., Karl'ik M., Vanmeensel K. and J.Vleugels, "Mechanical properties of spark plasma sintered FeAl intermetallics," *Intermetallics*, vol. 18. – No. 7. – Pp. 1410-1414, 2010.
- Shongwe M.B., Diouf S., Durowoju M.O. and Olubambi P.A. "Effect of sintering temperature on the microstructure and mechanical properties of Fe-30%Ni alloys produced by spark plasma sintering," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 649. – Pp. 824- 832, 2015/11/15/ 2015
- Zhang Z., Han B., Huang J., Han Y., Zhou Y., Kakegawa K. et al., "Mechanical behavior of cryomilled Ni superalloy by spark plasma sintering," *Metallurgical and Materials Transactions A.* – Vol. 40. – Pp. 2023-2029, 2009.

Information about authors

Kurbanbekov Sherzod – doctor PhD, associate professor, Khoja Akhmet Yassawi University, Head of the SRI Natural Sciences, Nanotechnologies and New Materials, Turkestan, Kazakhstan, E-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz, +7 702 400 34 88

Tabiyeve Yerkezhan – doctor PhD, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan. E-mail: etabieva@edu.ektu.kz, +7 777 328 05 35

Kizatov Aibar Sovetbekuly – doctoral student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan. E-mail: akizatov@edu.ektu.kz

Nurken Mussakhan – Master of pedagogical sciences (Physics), Khoja Akhmet Yassawi University, SRI Natural Sciences, Nanotechnologies and New Materials, Turkestan, Kazakhstan, E-mail: nurken.mussakhan@ayu.edu.kz, +77786133168

Amangeldiyeva Yulduz – master student, Yasavi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, E-mail: yulduz.amangeldiyeva12345@mail.ru, +7778 640 4486