

Қурбанбеков Ш.Р.¹, Эртаев Н.С.², Айдарова М.Т.³, Қожахметов Е.А.⁴, Амангельдиева Ю.О.⁵

¹PhD, қауымдастырылған профессор, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

²магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, (Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: nursultan.ertayev@ayu.edu.kz

³PhD докторанты, Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Қазақстан, Өскемен қ.), e-mail: maidarova@ektu.kz

⁴PhD, Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Қазақстан, Өскемен қ.), e-mail: ykozhaqmetov@ektu.kz

⁵магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: yulduz.amangeldiyeva@ayu.edu.kz

МЕХАНОАКТИВАЦИЯ ТҮРЛЕРІНІҢ WC ҚОРЫТПАЛАРЫНА ӘСЕРІ INFLUENCE OF TYPES OF MECHANOACTION ON WC ALLOYS ВЛИЯНИЕ ВИДОВ МЕХАНОАКТИВАЦИИ НА WC СПЛАВЫ

Аңдатпа. Бұл мақалада механоактивацияның (МА) вольфрам карбиді негізіндегі қорытпаларға әсері туралы зерттеулерге шолу жасалған. МА материалтану саласында кеңінен қолданылады және қоспалардың реакциялық белсенділігін арттыру мақсатында олардың физика-механикалық қасиеттерін өзгертуге бағытталған. Вольфрам карбиді негізіндегі қатты қорытпалар өнеркәсіптің әртүрлі салаларында кеңінен қолданылады, өйткені олар тамаша механикалық қасиеттерге, ерекше тозуға төзімділікке, жоғары беріктік пен термиялық төзімділікке ие. Осыған байланысты, вольфрам карбиді негізіндегі қатты қорытпалар өндірісінің кесу құралдарын жасауға ең жарамды болып табылады. Сонымен қатар, мақалада әртүрлі зерттеулерде қолданылатын механоактивацияның күрделі түрлеріне талдау келтірілген. Алынған қорытпалардың физика-механикалық қасиеттеріне механоактивацияның түрлерінің әсері де қарастырылады. Ұшқынды плазмалық агломерациялау (SPS) әдісімен алдын ала механоактивация жүргізілген ұнтақ үлгілерінен қатты қорытпа алудың оңтайлы параметрлеріне талдау жүргізілді, бұл материалдардың жоғары тығыздығы мен беріктігіне қол жеткізуге мүмкіндік береді. Сондай-ақ, механоактивация уақытының және кейінгі ұшқын-плазмалық агломерацияның вольфрам карбиді қорытпаларының микроқұрылымы мен механикалық қасиеттеріне әсерін зерттеуге ерекше назар аударылады. Механоактивация уақыты мен алынған қорытпалардың қасиеттері арасындағы байланысты түсіну әртүрлі өнеркәсіптік қолданбаларда қолданылатын вольфрам қорытпаларының өндіріс процестерін оңтайландыру үшін өте маңызды.

Негізгі сөздер: механикалық белсендіру, механоактивация уақыты, вольфрам карбиді, белсендіру әдістері, механикалық қасиеттері, микроқұрылымы.

Abstract. This article reviews studies on the effect of mechanical activation (MA) on tungsten carbide-based alloys. MA is widely used in the field of materials science and is aimed at changing the physicochemical properties of additives in order to increase their reactivity. WC-based hard alloys are widely used in various industries, as they have excellent mechanical properties, exceptional wear resistance, high strength and thermal stability. In this regard, tungsten carbide-based hard alloys are most suitable for the production of cutting tools. In addition, the article provides an analysis of complex types of mechanical activation used in various studies. The effect of types of mechanical activation on the physicochemical properties of the obtained alloys is also considered. An analysis of the optimal parameters for obtaining hard alloys from powder samples pre-mechanically activated by the spark plasma sintering (SPS) method was carried out, which allows achieving high density and strength of materials. Special attention is also paid to studying the effect of mechanoactivation time and subsequent spark-plasma sintering on the microstructure and mechanical properties of tungsten carbide alloys. Understanding the relationship between mechanoactivation time and the properties of the resulting alloys is crucial for optimizing the production processes of tungsten alloys used in various industrial applications.

Key words: mechanical activation, MA time, WC, activation methods, mechanical properties, microstructure.

Аннотация. В настоящей работе представлен обзор исследований, направленных на получение сплавов на основе карбида вольфрама с предварительно проведенной механоактивацией (МА). МА широко применяется в области материаловедения и направлена на изменения физико-механических свойств материалов с целью повышения активности их реакции. В связи с этим, основное внимание в данной статье направлено на исследование влияния механоактивации на смеси на основе карбида вольфрама. Твердые сплавы на основе

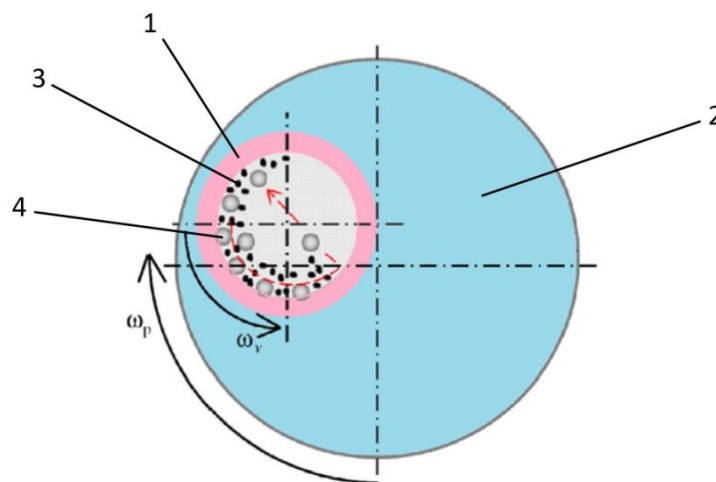
карбид вольфрама используются в различных промышленных условиях, благодаря их отличным механическим свойствам и выдающейся износостойкости в сочетании с высокой прочностью и термостойкостью, более того больше половины производства твердых сплавов на основе карбид вольфрама связана с изготовлением режущих инструментов. В статье также приведены комплексные виды механической активации, применяемых в различных исследованиях. А также рассмотрено влияние видов механоактивации смесей и длительности ее проведения на физико-механические свойства полученных сплавов последующими методами синтеза. Проведен анализ оптимальных условий для консолидации порошков методом искро-плазменного спекания (ИПС), что позволяет достигать высокой плотности и прочности материалов. Также особое внимание уделено влиянию времени механической активации и последующего искроплазменного спекания на микроструктуру и механические свойства сплавов карбида вольфрама. Понимание связи между временем механоактивации и свойствами полученных сплавов особенно важно для оптимизации процессов производства тяжелых вольфрамовых сплавов, используемых в различных промышленных применениях.

Ключевые слова: механоактивация, время МА, WC, методы активации, механические свойства, микроструктура.

Кіріспе

Вольфрам карбиді (WC) қатты қорытпалар өндірісінде ең жиі қолданылатын компоненттердің бірі болып табылады [1]. Осы құрамға негізделген қоспаларды кескіш құралдарды жасау үшін пайдаланған жағдайда, бір фазалы үлгілер мәні зор, өйткені олар көп фазалы үлгілерден айырмашылығы жоғары термиялық тұрақтылығымен ерекшеленеді. Сондықтан компонентті қорытпаларда фазалық ауысуларды бақылау үшін ұнтақтарға алдын ала механоактивация жүргізіледі.

Механоактивация ұнтақтау немесе араластыру сияқты механикалық өңдеу арқылы заттың немесе заттар қоспасының химиялық белсенділігін арттыратын процесс. Бұл процессте компоненттердің өзара байланысуы ақаулардың жинақталу жылдамдығы олардың жойылу жылдамдығынан асатын кезде пайда болады. МА центрден тепкіш, планетарлық және реактивті диірмендерде, дезинтегратор сияқты құрылғыларда жүзеге асырылады [2,3]. Ұнтақ композицияларында МА нәтижесінде белсенді фазалық түрлендірулер пайда болады, олар қатты материалдардың дисперстік нығаюын қамтамасыз ететін әртүрлі аралық қосылыстардың түзілуіне алып келеді [4-6]. Тепе-теңдік күйден қашықтығы ұлғайған сайын жүйенің күйін анықтайтын параметрлердің саны артады. Жоғары тепе-теңдіксіз жағдайларда түзілген құрылымдар тұрақты, сондықтан көп компонентті қоспалардың механикалық активтенуі кезінде бөлшектер құрылымының эволюциясын мұқият зерттеу қажет [7]. Көп жағдайда, МА жоғары энергиялы шарлы диірмендер арқылы жүргізіледі (сурет 1)—бұл нанокұрылымды және аморфты материалдарды өндірудің экономикалық, қарапайым және тиімді әдісі болып табылады [8].



Сурет 1. Планетарлық шарлы диірменнің және құтысының схемалық диаграммасы: 1 – айналымды құты; 2 – айналымды барабан; 3 – ұнтақ; 4 – металл шарлар [8].

Ұнтақтаудың негізгі мақсаты – энергия шығынын барынша азайта отырып, ұнтақтың меншікті беткі ауданын арттыру, ал активтендіру міндеті келесі химиялық түрлендірулер үшін активтену энергиясын азайту үшін кристалдарда энергияны ақаулар түрінде жинақтау [9,10]. Шарлы диірмендерде вольфрам тотығын аморфты көміртегімен араластыру вольфрам карбидін алудың классикалық әдісі ретінде өткен ғасырдағы оқулықтарда сипатталған. Араластырудан кейін алынған қоспа сутегі атмосферасында вольфрам карбиді синтезінің химиялық реакция тудыруға арналған пешке жүктеледі [11-13]. МА-дан басқа, әртүрлі салаларда қолданылатын физикалық, химиялық, термиялық және осы әдістердің кешенді белсендіру түрлері де бар.

Бұл жұмыстың мақсаты WC негізіндегі қорытпалардың микроқұрылымына, механикалық қасиеттеріне және фазалық құрамына механоактивацияның әртүрлі түрлерінің әсерін зерттеу болып табылады.

Механикалық активацияның комплекстік түрлері

Механикалық термиялық өңдеу

Механотермиялық өңдеу механоактивация мен термиялық өңдеудің кешенді түрі. Механотермиялық өңдеудің мәні реагенттерді шарлы диірменде инертті атмосферада әрекеттесетін бөлшектердің беті үнемі жаңаратын температурада ұзақ уақыт ұнтақтау болып табылады, ал реакция жылдамдығы реакцияға түсетін компоненттердің бір-біріне диффузиясына аз тәуелді болады [14]. Дегенмен, термиялық күйдіру механотермиялық белсендіру сатысынан кейін қажетті кристалдық құрылымды алу үшін қажет, бұл энергия шығынының артуына алып келеді [15,16].

Баженов пен Курловтың жұмысында [17] механотермиялық өңдеу мен одан кейінгі қатты күйдегі әдістермен WC қорытпаларын синтездеу жүргізілді. Зерттеу таза вольфрам (W) және көміртегі (C) қоспасының 1000-нан 1200°C-қа дейінгі температура диапазонында жүргізілген МА қатты қорытпа алу үшін жүргізілген синтез процесіне айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Алайда, синтез кезінде бір фазалы көміртек түзілгенімен, соңғы қорытпада бос көміртектің артық мөлшері болатынын көрсетті. МА кезінде синтезделген WC орташа түйіршік мөлшері кішірек болды.

Қатты күйдегі механоактивацияланған реакция деп аталатын процесс нәтижесінде үштік карбид CoWC түзілуіне назар аудара отырып, Цучида және әріптестері зерттеу жүргізді [18]. Бұл кобальт (Co), вольфрам (W) және көміртектің (C) ұнтақ қоспаларын белгілі бір молярлық қатынаста ұнтақтап, содан кейін оларды жоғары температурада қыздырды. Бір фазалы CoWC қосылысына жету үшін оңтайлы молярлық қатынас Co/W/C=7/7/2 екендігі анықталды. Бұл қоспаны 4 сағат бойы ұнтақтап, 1100°C дейін қыздырғанда, 800°C салыстырмалы төмен температурада түзілу басталғанымен CoWC сәтті қалыптасты. Тұтастай алғанда, алынған деректер механикалық активациялау бақыланатын қыздырумен үйлескенде, төмен температурада үштік карбидтерді тиімді құра алатынын көрсетеді, бұл басқа күрделі материалдардың синтезіне әсер етуі мүмкін.

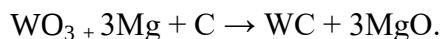
Наноөлшемді WC бөлшектерін әртүрлі температурада вакуум жағдайында WO₃ және графиттің механикалық активацияланған қоспасын қыздыру арқылы да синтездеуге болады [19]. WO₃-C ұнтақ қоспасын МА-ның өзі WC фазасының пайда болуына әкелмейтіні анықталды. Дегенмен, қоспаны 1250°C температурада 2 сағат бойы қыздыру WC нанобөлшектерінің пайда болуына әкелді. Бұл WO₃-ті WC-ге сәтті түрлендіру үшін белгілі бір температура өте маңызды екенін білдіреді. Қоспаға KCl қосу нәтижесінде жұқа және біркелкі WC бөлшектері пайда болды. Керісінше, никельдің болуы WC бөлшектерінің өсуіне ықпал етті, бұл қоспалар нанобөлшектердің морфологиясы мен өлшемін реттеуде маңызды рөл атқарады деп болжайды. Алынған нәтижелер синтез процесінде температура мен қоспалардың маңыздылығын көрсетеді және жоғары сапалы вольфрам карбидінің нанобөлшектерін алу шарттарын оңтайландыру туралы түсінік береді. Наноқұрылымды WC

ұнтақтарының синтезі МА-ны қамтитын екі сатылы процесті, содан кейін термиялық активациялау жайлы Калдеронның жұмысында [20] хабарланған. Синтезделген нанокұрылымды WC ұнтақтары агломерациядан кейін WC негізіндегі қатты материалдардың механикалық қасиеттерін жақсарту үшін қажетті жұқа микроқұрылымдарды құрады. Бұл жақсарту сәтті синтез процесі мен ұнтақтау параметрлері мен көміртегі көзін мұқият таңдаумен байланысты. Осылайша, зерттеу нәтижелері қатты материалдардың механикалық қасиеттерін жақсарту үшін шешуші маңызы бар нанокұрылымды WC ұнтақтарын синтездеуде механикалық активациялаудың да, көміртегі көзін таңдаудың да маңыздылығын көрсетеді.

Оро және әріптестері [21] механотермиялық өңдеуді WC ұнтақтарын синтездеу үшін әртүрлі көміртек көздерін (графит және көміртекті қара) және әртүрлі атмосферада (Ar, Ar-50H₂, Ar-10CO) 1100°C дейінгі температурада жүргізді. Нәтижесінде дән өлшемдері 200 нм-ден аз бір фазалы WC ұнтақтары алуға болатыны анықталды. Осылайша, WC синтезі Ar және Ar-10CO атмосфераларында 1100°C температурада аяқталып, көміртегі қара сутегі атмосферасында графитке қарағанда тиімдірек болды.

Механохимиялық синтез

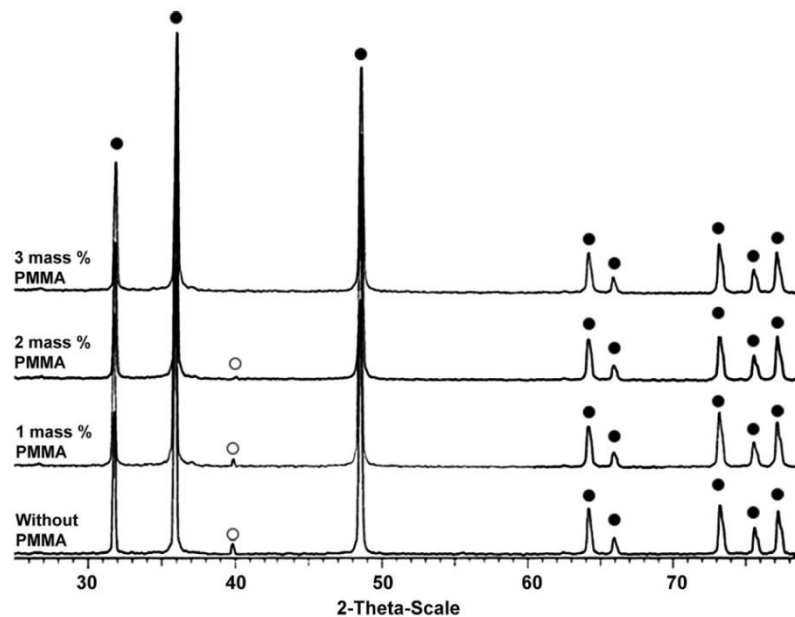
Механохимиялық синтез (МХС)—механикалық әсер ету кезіндегі химиялық және физика-химиялық процестерді жеделдету немесе тиімділігін арттыру [22]. МХС қазіргі уақытта құрылыс, фармацевтика, химия және басқа салаларда технологиялық процестерді интенсификациялау үшін сәтті қолданылады. Онищенко мен Реваның жұмыстарында [23] жоғары температуралық МХС арнайы жасалған эксперименттік қондырғыда, ал WC синтезі Ягофаров және әріптестері [24] жасаған зерттеулерінде төменде келтірілген реакция бойынша жүргізілді:



Жұмыс реакциядағы полиметилметакрилаттың (ПММА) мөлшерін 3%-ға дейін арттыру W₂C фазасының құрамының төмендеуіне әкелетінін көрсетті. Синтезделген ұнтақтардың шоғырлануға бейімділігі жоғары болды. Ал синтезделген ұнтақтағы ПММА азырақ болған жағдайда W₂C фазасы байқалды. Сондай-ақ құрамның W₂C-тен WC-қа толық ауысуына Ян [25] жұмысындағыдай балқытылған тұзды қолдану арқылы синтездеу кезіндегі реакция жағдайларын жоғарылату, сұйық фазадағы химиялық реакциямен механикалық қоспалауды біріктіру әсер етуі мүмкін: соңғы қорытпалар 300-ден 500 нм-ге дейінгі бөлшектердің өлшемімен сипатталды, бұл нанокұрылымдық материалдардың сәтті синтезделуін көрсетеді. Сондай-ақ зерттеуде бөлшектердің агрегациясының маңызды екендігі атап өтілді.

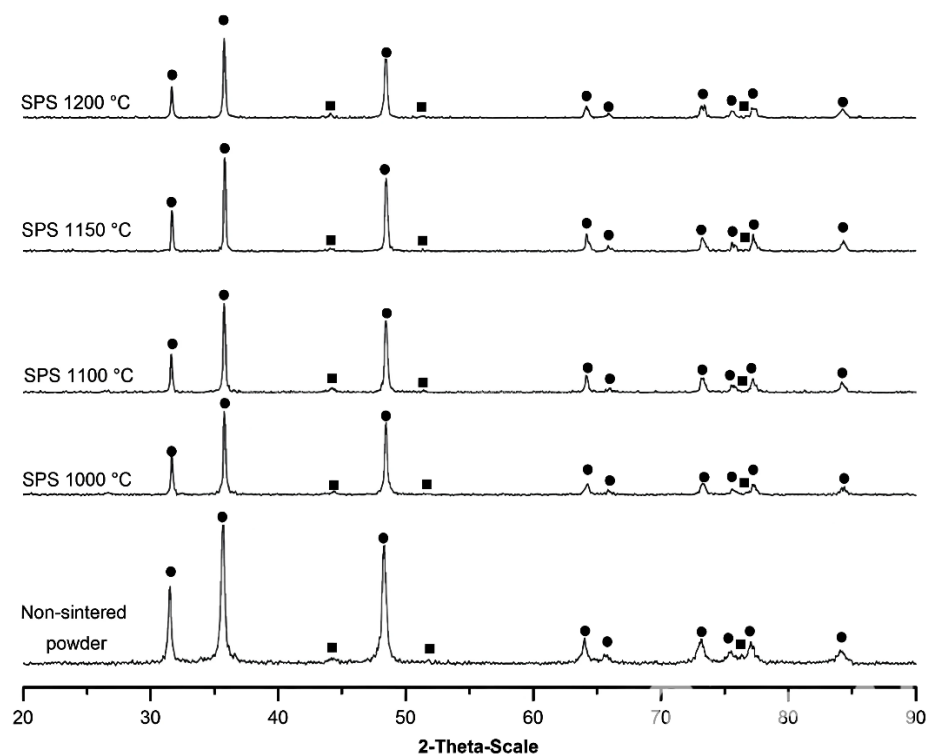
Вольфрам карбиді ұнтақтары (WC және W₂C) сонымен қатар МХС арқылы WCl₆ және Na₂CO₃-тен синтезделеді [26]. Айтекиннің бұл зерттеуі стехиометриялық немесе 50 масс.% артық магнийдің қосылуы WC және W₂C екеуінің түзілуіне әкелетінін көрсетті, ал артық Na₂CO₃ WCl₆ және WO₂Cl₂-ні бұзады, тек W₂C, WC және W фазаларын құрайды.

Шичалин және оның әріптестерінің [27] жұмыстарында жоғары температуралық механикалық-химиялық синтезді қолдану арқылы алынған вольфрам карбиді ұнтағынан SPS әдісімен WC-(8%)Ni-(8%)Fe синтезі зерттелді. XRD деректері бойынша W₂C шыңының қарқындылығы құрғақ қоспадағы ПММА концентрациясына кері пропорционалды (сурет 2).



Сурет 2. Құрғақ қоспадағы әртүрлі ПММА мөлшерімен алынған ұнтақтардың фазалық құрамы: ● – WC; ○ – W₂C [27]

Нәтижелер әр түрлі температурада (1000-1200°C) агломерацияланған барлық үлгілердің фазалық құрамының бірдей дерлік сақталатынын көрсетеді (сурет 3).



Сурет 3. Бастапқы WC-8Ni-8Fe ұнтағының және оның негізіндегі SPS қорытпаларының фазалық құрамы (● – WC; ■ – Ni/Fe) [27]

Ұсынылған тәсіл технологиялық енгізу үшін перспективалы болып табылады, өйткені SPS және механохимия әдістерінің жоғары тиімділігі, сондай-ақ қолжетімді прекурсорлар мен арзан байланыстырғыштарды (Ni және Fe) пайдалануға мүмкіндік береді. Алынған қорытпалар белгілі қатты қорытпаларға арзан балама бола алады [27].

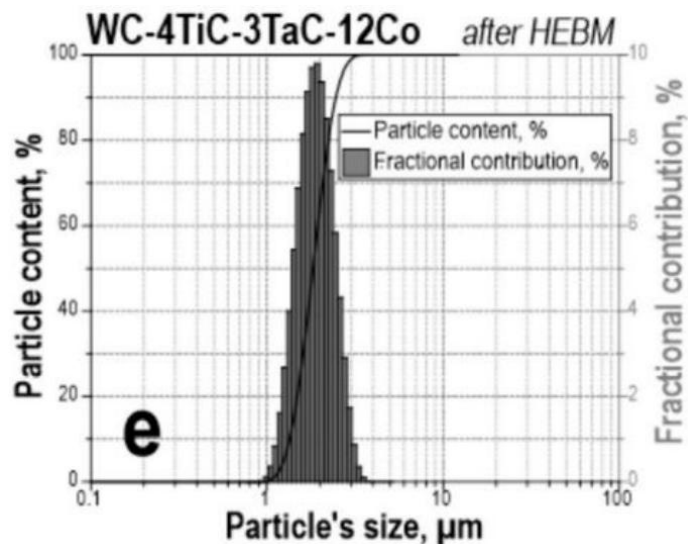
Ультрадыбыстық механоактивация

МА-ның дәстүрлі әдістерімен қатар ультрадыбыстық МА-ның үлкен әлеуеті бар, сондықтан ультрадыбыстың мүмкіндіктерін толық пайдалану үшін оның негізінде жатқан процестерді толығырақ талдау қажет. Бұл әдіс механикалық активациялау процесін қысқа мерзімде жүргізуге, ластанудың жағымсыз құбылыстарын жоюға, қажетті фракцияның жоғары үлесі бар ұсақ дисперсті және тіпті нанокристалды ұнтақтарды алуға мүмкіндік береді [28]. Қазіргі уақытта ультрадыбыстық өңдеу (UST) материалдардың микроқұрылымы мен механикалық қасиеттерін өзгертудің жоғары тиімді әдістерінің бірі [29-31].

Ультрадыбыстық өңдеудің оңтайлы режимі жоғары гидростатикалық қысым кезінде кавитация режимінде болатындығы Рубаниктің жұмысында [32] айтылған. Ван және оның әріптестерінің жұмысында [33] лазерлік қаптау әдісімен IN718, IN718-50% WC және IN718-50% WC (алдын ала ультрадыбыстық өңдеумен) композиттік жабындар алынды. WC бөлшектерінің ыдырауы композиттік жабындардың микроқаттылығын және тозуға төзімділігін айтарлықтай жақсартты. Ультрадыбыспен алынған композиттік жабынның мәндері келесі көрсеткіштерге ие болды: микроқаттылығы—478,15 HV_{0,2}; үйкеліс коэффициенті—0,494.

Дәстүрлі түрде МА-ланған WC негізделген ұнтақтардан SPS әдісімен алынған қорытпалар

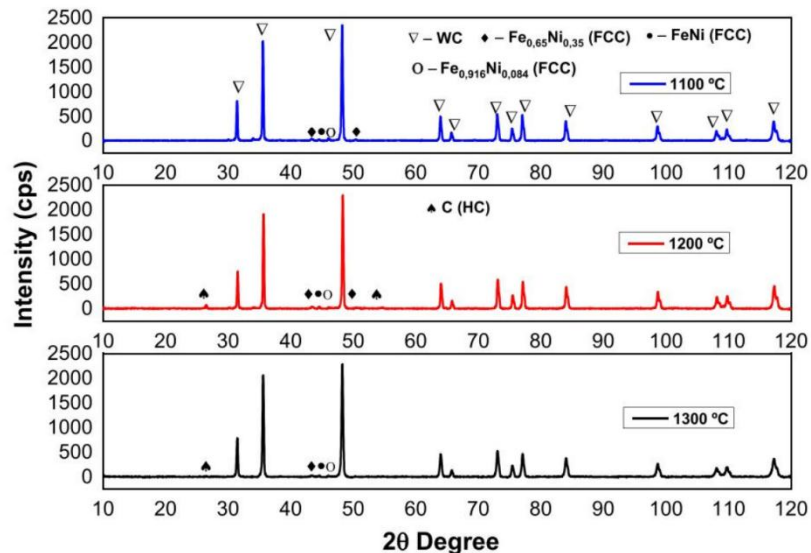
Планетарлық шар диірменінде механоактивациялау арқылы Буравлев т.б. жұмыстарды [34] WC—4% TiC—3% TaC—12% Co салмағы 50 г қоспасымен жүргізді. Іске қосу 10 цикл үшін 700 айн/мин айналу жылдамдығымен жүзеге асырылды, олардың әрқайсысы 15 минут ұнтақтаудан және 15 минут ұнтақтау шыныаяқын салқындатудан тұрады. Содан кейін SPS технологиясының көмегімен әртүрлі температураларда қорытпа алынды: 1000°C, 1100°C, 1150°C, 1200°C. МА нәтижесінде ұнтақ бөлшектердің орташа өлшемінің 2 мкм-ге дейін төмендеуімен кішірек өлшемдерге қарай бөлшектер өлшемдерінің таралуының айтарлықтай ығысуын көрсетті (сурет 4).



Сурет 4. Механикалық активацияланған WC-4%TiC-3%TaC-12%Co аралас композициясының гранулометриялық құрамының бөлшектерінің өлшемдерінің таралуы [34]

Буравлев және оның әріптестері планетарлық диірмендегі алдын ала МА агломераттарды ұнтақтауға және бөлшектердің өздеріне ықпал ететінін анықтады, бұл ұнтақты кейіннен SPS әдісімен кезінде тығыздау процесін күшейтті. Ең жақсы біртектілік пен тығыздық үшін оңтайлы агломерация температурасы да алынды: 1200°C. Зерттеу

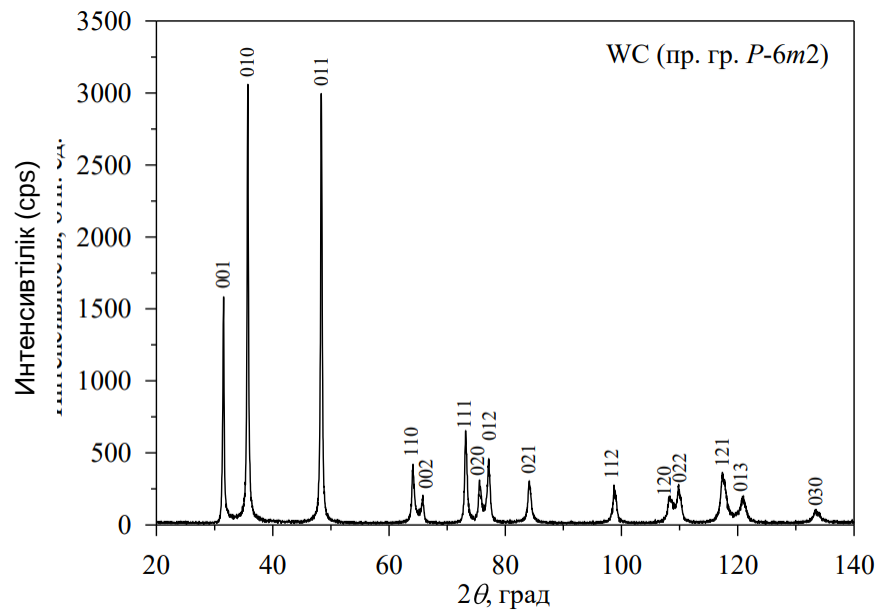
барысында келесі нәтижелер анықталды: салыстырмалы тығыздық– 99,99%; қаттылық, HV30 – 1623,2; иілу күші–1125,1 МПа [34]. Сильваның [35] жұмысында WC-FeNi қорытпасын WC-Co қорытпасына балама ретінде зерттеуге бағытталған, МА мен қатар SPS орындалды. МА кезінде шарлардың ұнтаққа массалық болды. Жұмыс авторлары алынған WC-FeNi қорытпасының талдауы көміртегі тапшылығы бар сынғыш η -фазалар түзілмей, оның микроқұрылымында WC дәндерінің жақсы таралуын көрсетті деп мәлімдейді. Алынған қорытпаның нәтижелері 1300°C температурада ең жақсы болды: қаттылық–1933 HV; тығыздығы – 99%; сыну беріктігі–11 МПа м^{0,5}. Рентгендік дифракция үлгісін талдау кезінде (сурет 5) Ni-мен тұрақтандырылған Fe-нің аустениттік фазалары байқалды .



Сурет 5. Синтезделген WC-6,4Fe3,6Ni рентгендік дифракциялық үлгілері [35]

Осыған ұқсас нәтижені Шуберт және оның әріптестері [36] Fe және Ni 7:3 қатынасымен растады. Чувилдеевтің [37] W-Ni-Fe және W-Ni-Fe-Co қорытпаларының механикалық қасиеттері мен құрылымына арналған жұмысында жоғары энергиялық МА, одан кейін SPS арқылы қорытпа алудың арқасында макросерпімділік 230 МПа-дан 635 МПа-ға дейін жоғарылауы анықталды. Нәтижесінде, жоғарыда аталған жұмыстарда алынған қорытпалардың біртектілігі, қаттылығы және тығыздығы басқа жұмыстарда бірдей агломерациялық температураларда алынғанға қарағанда жоғары болды, дәл осы алдын ала механикалық активациялауға байланысты, соның арқасында WC байланыстырғыш компоненті ұнтақталды.

Планетарлық шарлы диірменде ұнтақ қоспасының (W+C) механоактивациялануы арқасында бір фазалы WC (сурет 6) 1200°C температурада вакуумда келесі сипаттамалармен синтезделді: $C_{жалпы} = 6,16\%$ масс., $C_{бос}$ – анықталмады; $D_{орташа} = 0,3$ мкм, $D_{мин} = 0,2$ мкм, $D_{макс} = 0,7$ мкм. МА-сыз және бірдей синтез параметрлерімен ұқсас құрамдағы ұнтақ қоспасынан құрамында WC, W_2C және W фазалары анықталды [38].



Сурет 6. W және C (аморфты көміртек) механикалық активацияланған ұнтақ қоспасынан вакуумда 1200°C температурада синтезделген WC ұнтағының рентгендік дифракциялық үлгісі [38]

Қорытпалардың микроқұрылымына және механикалық қасиеттеріне МА уақытының әсері

МА уақыты вольфрам қорытпасының тығыздығы мен микроқұрылымына тікелей әсер етеді, ол Чувилдеевтің [39] зерттеуінде анықталды, мұнда WC негізіндегі ұнтақтың механикалық активтену уақыты 10 секундтан 300 секундқа дейін ұзарған сайын ұнтақтағы құрылымдық өзгерістер, оның құрамындағы заттың әсер етуші және морфологиялық құрамының жоғарылауы туралы қорытындыға келді. одан кейінгі агломерациялық процестерді жеңілдететін бөлшектер мөлшерінің төмендеуі. Осылайша, зерттеу көрсеткендей, механикалық активациялау WC негізіндегі ұнтақтың қасиеттеріне айтарлықтай әсер етеді, оның фазалық құрамының, бөлшектердің өлшемі мен дислокация тығыздығының өзгеруіне байланысты қатты қорытпаларды агломерациялауда қолдануды кеңейтеді.

МА уақытының қорытпалардың құрылымы мен механикалық қасиеттеріне әсері Абдулменова мен Кулковтың [40] жұмыстарында да атап өтілген. Бұл қатынастарды түсіну процестерін оңтайландыру үшін ерекше маңызды болып табылады. Абдулменова мен оның әріптестерінің зерттеуі [41] агломерацияланған бөлшектердің орташа мөлшері 300 секунд МА-дан кейін кейін 350 мкм-ден 15 мкм-ге дейін айтарлықтай төмендегенін көрсетті, сонымен қатар $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ карбид фазасының болуы анықталды, бұл қатты фазаның МА-ның барлық сипаттамаларын ұзақ мерзімді жақсартуға әкелуі мүмкін екенін көрсетеді. МА физикалық-механикалық қасиеттерді жақсартуға, әсіресе өңдеу 60-тан 100 секундқа дейін белгілі бір уақыт аралығында жүргізілген жағдайда, дәннің өсуін бәсеңдететіні белгілі болды. Ли және оның әріптестерінің зерттеуінде [42] МА механикалық фрезерлеу (МФ) арқылы жүзеге асырылды, WC-8Co-2Al цементтелген карбид қорытпасы SPS әдісімен сәтті шығарылды. МФ 55 сағат бойы жүргізілді, нәтижесінде дән мөлшері 340 нм-ден 27 нм-ге дейін төмендеді, бірақ ұзағырақ ұнтақтау кезінде агломерацияланған карбид қорытпаларының қасиеттері мен тығыздығының төмендеуі байқалды. 55 сағат жүргізілген МФ арқылы алынған компоненттің SPS-тен кейін 3000 А ең жоғары импульс кезінде қаттылығы мен беріктігі сәйкесінше 89 HRA және 1702 МПа дейін өсті.

Жоғарыда аталған зерттеулердің нәтижелерін қорытындылай келе, МА ең аз бөлшектері және аз агломерациялары бар WC компоненттерін алу процесінің ажырамас бөлігі болып табылады және МА уақыты мен материалдың құрылымы мен механикалық қасиеттері арасындағы байланысты түсіну SPS әдісімен қатты, берік және тығыз қорытпаларды алуға ықпал етеді деп қорытынды жасауға болады.

Қорытынды

Көпкомпонентті қорытпаларды алуда МА маңызды рөл атқарады және онсыз зерттеуде күтілетін және алынған нәтижелер арасындағы сәйкессіздік ықтималдылығы биік болып келеді. Бұл жұмыста вольфрам карбиді (WC) қорытпаларының механикалық қасиеттері мен микроқұрылымына МА әсерін жан-жақты талдау жүргізіледі. Зерттеу МА реактивтілік, құрылымның біртектілігі және тамаша механикалық қасиеттері бар наноқұрылымды қорытпаларды алу мүмкіндігі сияқты ұнтақ материалдардың сипаттамаларын жақсартудың негізгі қадамы екенін растады.

МА құрылымдық ақаулардың жинақталуына, бөлшектердің мөлшерін азайтуға және олардың химиялық белсенділігінің артуына ықпал етеді, бұл синтез процестерін жеделдетуге және соңғы материалдың сапасын жақсартуға мүмкіндік береді. МА-ның әртүрлі тәсілдері қарастырылды, соның ішінде механикохимиялық, ультрадыбыстық және механикотермиялық өңдеу. МА-ны термиялық өңдеумен бірге қолдану бөлшектердің өлшемі 200 нм-ден аз наноқұрылымды WC ұнтақтарын алуға мүмкіндік береді, бұл механикалық қасиеттері жақсартылған материалдарды құру перспективаларын ашады. Ультрадыбыстық МА жоғары сапалы қатты қорытпаларды өндіру үшін маңызды болып табылатын жұқа ұнтақтарды ластанусыз жеделдетілген өндіру мүмкіндігін көрсетеді. МА әдістерін қолдану арқылы алынған WC негізіндегі қорытпалар жоғары тығыздыққа, беріктікке және тозуға төзімділікке ие, бұл оларды кескіш құралдарда және басқа өнеркәсіптік салаларда қолдануға өте ыңғайлы етеді. Күрделі емес МА жоғары сапалы нәтижелерді алуға көмектеседі, әсіресе ұнтақ SPS әдісі арқылы қорытпа алуға арналған жағдайда.

Механохимиялық синтез наноқұрылымды материалдарды (300-500 нм) синтездеуге мүмкіндік береді, жоғары температуралық процестерді қолданбай химиялық реакцияларды жылдамдатады және фазалық құрамның біртектілігін қамтамасыз етеді (мысалы, $W_2C \rightarrow WC$ ауысуы). Дегенмен, процесс ұзақ өңдеу кезінде ұнтақтың ластану қаупін тудырады, бұл параметрлерді (уақыт, реагент қатынасы) өте дәл бақылауды талап етеді. МХС аспаптық болаттар үшін үштік карбидтерді (CoWC) синтездеу және агломерацияланған композиттерге арналған WC наноұнтақтарын өндіруде қолданылады.

Ультрадыбыстық МА өңдеу уақытын 5-10 есе қысқартады, сұйық ортада өңдеу арқылы ұнтақтың ластануын жояды және кристал құрылымын өзгертпестен агломераттардың мөлшерін азайтады. Мұндай өңдеудің кемшіліктері жоғары пластикалық материалдар үшін шектеулі тиімділікті қамтиды. Ол ұнтақ металлургиясы үшін жұқа Al/W ұнтақтарын дайындау және каталитикалық жүйелер үшін оксид ұнтақтарын (Co_3O_4) модификациялау үшін жарамды.

Механотермиялық өңдеу WC синтезінің температурасын 200–300°C төмендетуі мүмкін, сонымен қатар қоспалар (KCl, Ni) арқылы бөлшектердің морфологиясын бақылауға мүмкіндік береді. Ол екі сатылы процесс жағдайында жоғары энергия шығынына және WC синтезі кезінде бос көміртектің пайда болу қаупіне ие. Ол инертті атмосферада түйір өлшемдері 200 нм-ден аз бір фазалы WC синтезіне және жақсартылған жылу өткізгіштігі бар W-Cu композиттерін өндіруге қолданылады.

Дәстүрлі механикалық белсендіру жоғары энергия тиімділігіне ие және сонымен қатар бөлшектердің орташа өлшемін 4 мкм-ден 100–400 нм-ге дейін азайтуға қабілетті. Бірақ шамадан тыс ұнтақтау қасиеттердің нашарлауына алып келеді және ұзақ белсендіру кезінде артық фазалардың пайда болуына алып келуі мүмкін. Дәстүрлі МА аэроғарыш өнеркәсібіне

арналған WC негізіндегі композитті кескіш құралдар мен тозуға төзімді жабындарды өндіруге қолданылады, сонымен қатар кейінгі SPS әдісі арқылы қорытпаларды өндіру үшін тиімділігі жоғары.

Осылайша, мақаланың нәтижелері механикалық активациялау параметрлерінің маңыздылығын растайды, олардың арасында жоғары сапалы материалдарды алу үшін WC ұнтақтарын алдын ала өңдеу әдісі ретінде оны жүзеге асыру уақыты маңызды рөл атқарады. Іске қосу механизмдерін одан әрі зерттеу және процесс параметрлерін оңтайландыру бірегей қасиеттері бар қатты қорытпалардың жаңа буындарын әзірлеуге мүмкіндік береді.

Алғыс

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады. (*грант № BR24992925*).

Список использованной литературы

1. Курлов, А. С., & Гусев, А. И. (2013). *Физика и химия карбидов вольфрама: монография*. Москва: Физматлит.
2. Лякишев, Н. П. (2000). *Энциклопедический словарь по металлургии: в 2 т. Т. 1*. Москва: Интернет Инжиниринг.
3. Малик, А. А., Закусилов, В. В., & Рыжков, А. А. (2014). Исследование влияния частоты механоактивации компонентов шихты на процесс получения пористых материалов самораспространяющимся высокотемпературным синтезом. В *Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XX Всероссийской научно-технической конференции* (Т. 2, с. 176–179). Томск: Изд-во ТПУ.
4. Дмитренко, Д. В., Бледнова, Ж. М., & Балаев, Э. Ю. О. (2017). Эволюция структуры многофазных порошковых материалов с ЭПФ на различных этапах процесса механоактивации. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, (132), 1216–1229.
5. Анциферов, В. Н., Пещеренко, С. Н., & Ярмонов, А. Н. (2000). Неравновесная растворимость при механическом легировании. *Физика и химия обработки материалов*, (12), 13–18.
6. Сметкин, А. А., Кузнецов, А. В., & Петров, И. И. (2004). Влияние высокоэнергетической механоактивации порошковых смесей на формирование структуры и свойств материалов на основе титана. *Порошковая металлургия*, (27), 61–64.
7. Каченюк, М. Н., & Сметкин, А. А. (2014). Эволюция структуры композиционных частиц при механоактивации порошковых смесей на основе титана, карбида кремния и углерода. *Современные проблемы науки и образования*, (6), 111.
8. Kieback, B., Kubsch, H., & Bunke, A. (1993). Synthesis and properties of nanocrystalline compounds prepared by high-energy milling. *J. Phys. IV*, 3, 1425–1428.9. Болдырев, В. В. (2006). Механохимия и механическая активация твердых веществ. *Успехи химии*, 75(3), 203–216. <https://doi.org/10.1070/RC2006v075n03ABEH001205>
9. Болдырев, В. В. (2006). Механохимия и механическая активация твердых веществ. *Успехи химии*, 75(3), 203–216. <https://doi.org/10.1070/RC2006v075n03ABEH001205>
10. Болдырев, В. В. (1983). *Экспериментальные методы в механохимии твердых неорганических веществ*. Москва: Мир.
11. Косолапова, Т. Я. (1968). *Карбиды*. Москва: Металлургия.
12. Логинов, Ю. Н. (1984). *Технология получения заготовок из твердого сплава: учебное пособие*. Свердловск: УПИ им. С. М. Кирова.
13. Третьяков, В. И. (1976). *Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов*.
14. Rakhimova, A. K., & Galeleyeva, A. K. (2019). Методы синтеза литий железа фосфата: микроволновой синтез – перспективный метод для синтеза LiFePO₄. *Chemical Journal of Kazakhstan*, 1(1), 1–10.
15. Morgan, D., Van der Ven, A., & Ceder, G. (2004). Li conductivity in Li_xMPO₄ (M = Mn, Fe, Co, Ni) olivine materials. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 7, 30–32.
16. Franger, S., Bourbon, C., & Le Cras, F. (2004). Optimized lithium iron phosphate for high-rate electrochemical applications. *Journal of The Electrochemical Society*, 151, 1024.

17. Bazhenov, S. V., & Kurlov, A. S. (2022). Effect of mechanical activation and solid-state synthesis temperature on the composition and grain size of tungsten carbide. *AIP Conference Proceedings*, 2466(1).
18. Tsuchida, T., & Morita, N. (2002). Formation of ternary carbide $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ by mechanical activation assisted solid-state reaction. *Journal of the European Ceramic Society*, 22(13), 2401–2407.
19. Kariminejad, A., et al. (2014). Mechanically activated synthesis of tungsten carbide nanoparticles from tungsten oxide. *Advanced Materials Research*, 829, 622–626.
20. de Oro Calderon, R., et al. (2013). Synthesis of nanostructured tungsten carbide powders from mechanically activated mixes of tungsten oxide with different carbon sources. In *International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2013* (Vol. 1, pp. 89–94). Gothenburg, Sweden.
21. Oro, R., et al. (2017). Optimizing the synthesis of ultrafine tungsten carbide powders by effective combinations of carbon sources and atmospheres. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 63, 9–16.
22. Савостин, А. В., & Шурай, П. Е. (2009). Механохимическая активация в технологии сахарного производства. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, (1), 59–61.
23. Онищенко, Д. В., & Рева, В. П. (2011). Получение нанопорошка карбида вольфрама методом механической активации. *Физика и химия обработки материалов*, (2), 71–77.
24. Ягофаров, В. Ю. (2019). Механохимический синтез карбида вольфрама с использованием углерода различного происхождения. *Металлофизика легких сплавов*, (186).
25. Yang, R., Wang, Y., Zhang, Y., et al. (2011). Molten salt synthesis of tungsten carbide powder using a mechanically activated powder. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 29(1), 138–140.
26. Aytekin, N. Ö., Ağaoğulları, D., & Öveçoğlu, M. L. (2019). Mechanochemical synthesis of tungsten carbide powders induced by magnesiothermic reduction of WCl_6 and Na_2CO_3 raw materials. *Materials Research Express*, 6(9), 096517.
27. Shichalin, O. O., Kolesnikov, A. A., Kolesnikova, E. A., et al. (2020). SPS hard metal alloy WC-8Ni-8Fe fabrication based on mechanochemical synthetic tungsten carbide powder. *Journal of Alloys and Compounds*, 816, 152547.
28. Клубович, В. В., Костюк, В. А., & Левицкий, А. В. (2012). Ультразвуковая механоактивация порошков, используемых для синтеза электрокерамических материалов. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*, (2), 11–16.
29. Агранат, Б. А., Кузнецов, А. Ю., & Лебедев, В. А. (1986). *Ультразвук в порошковой металлургии*. Москва: Наука.
30. Артемьев, В. В., Клубович, В. В., & Рубаник, В. В. (2003). *Ультразвук и обработка материалов*. Минск: Экоперспектива.
31. Назарова, А., Мулюков, Р., Рубаник, В., и др. (2010). Влияние ультразвуковых колебаний на структуру и свойства ультрамелкозернистого никеля. *Физика металлов и металловедение*, 110(6), 600–607.
32. Рубаник, В. В., Костюк, В. В., & Костюк, А. В. (2016). *Ультразвуковая механоактивация порошков*.
33. Wang, J., et al. (2023). Ultrasonic-induced grain refinement in laser cladding nickel-based superalloy reinforced by WC particles. *Coatings*, 13(1), 151.
34. Buravlev, I. Y., et al. (2024). Microstructural evolution and mechanical behavior of WC-4wt.% TiC-3wt.% TaC-12wt.% Co refractory cermet consolidated by spark plasma sintering of mechanically activated powder mixtures. *Advanced Powder Technology*, 35(10), 104625.
35. da Silva, E. N., et al. (2021). Investigation of characteristics and properties of spark plasma sintered ultrafine WC-6.4 Fe-3.6Ni alloy as potential alternative WC-Co hard metals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 101, 105669.
36. Schubert, W. D., Weiss, H. J., et al. (2015). Aspects of sintering of cemented carbides with Fe-based binders. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 49, 110–123.
37. Chuvil'deev, V. N., et al. (2014). Sintering of nano- and ultradispersed mechanically activated W-Ni-Fe powders and the manufacture of ultrahigh-strength heavy tungsten alloys. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2014, 215–228.
38. Баженов, С. В., & Курлов, А. С. (2020). Твердофазный синтез карбида вольфрама в вакууме из механоактивированной смеси вольфрама и углерода. В *Современные синтетические методологии для создания лекарственных препаратов и функциональных материалов (MOSM 2020)* (с. 104). Екатеринбург.
39. Chuvil'deev, V. N., et al. (2023). Effect of mechanical activation time on the density of fine-grained tungsten alloy 90W-7Ni-3Fe, obtained by spark plasma sintering. *Физика металлов и металловедение*, 124(10), 931–938.
40. Abdulmenova, E. V., & Kulkov, S. N. (2020). The studies of the effect of mechanical activation of WC-based powder on its properties. *AIP Conference Proceedings*, 2310(1).

41. Abdulmenova, E. V., Rumyantsev, M. V., & Kulkov, S. N. (2022). Effect of mechanical treatment of powder on the structure and phase composition of hard alloys. *AIP Conference Proceedings*, 2509(1).
42. Li, X., et al. (2010). WC–8Co–2Al (wt%) cemented carbides prepared by mechanical milling and spark plasma sintering. *Materials Science Forum*, 638, 1817–1823.

References

1. Kurlov, A. S., & Gusev, A. I. (2013). *Fizika i khimiya karbidov vol'frama: monografiya*. Moskva: Fizmatlit.
2. Lyakishev, N. P. (2000). *Entsiklopedicheskiy slovar' po metallurgii: v 2 t. T. 1*. Moskva: Internet Inzhiniring.
3. Malik, A. A., Zakusilov, V. V., & Ryzhkov, A. A. (2014). Issledovanie vliyaniya chastoty mekhanoktivatsii komponentov shikhty na protsess polucheniya poristyykh materialov samoraspranyayushchimsya vysokotemperaturnym sintezom. V *Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost': materialy XX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (T. 2, s. 176–179). Tomsk: Izd-vo TPU.
4. Dmitrenko, D. V., Blednova, Zh. M., & Balaev, E. Yu. O. (2017). Evolyutsiya struktury mnogofaznykh poroshkovykh materialov s ÉPF na razlichnykh etapakh protsessa mekhanoktivatsii. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, (132), 1216–1229.
5. Antsiferov, V. N., Peshcherenko, S. N., & Yarmonov, A. N. (2000). Neravnovesnaya rastvorimost' pri mekhanicheskom legirovanii. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, (12), 13–18.
6. Smetkin, A. A., Kuznetsov, A. V., & Petrov, I. I. (2004). Vliyanie vysokoyenergeticheskoy mekhanoktivatsii poroshkovykh smesey na formirovanie struktury i svoystv materialov na osnove titana. *Poroshkovaya metallurgiya*, (27), 61–64.
7. Kachenyuk, M. N., & Smetkin, A. A. (2014). Evolyutsiya struktury kompozitsionnykh chastits pri mekhanoktivatsii poroshkovykh smesey na osnove titana, karbida kremniya i ugleroda. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, (6), 111.
8. Kieback, B., Kubsch, H., & Bunke, A. (1993). Synthesis and properties of nanocrystalline compounds prepared by high-energy milling. *J. Phys. IV*, 3, 1425–1428.
9. Boldyrev, V. V. (2006). Mekhanokhimiya i mekhanicheskaya aktivatsiya tverdykh veshchestv. *Uspekhi khimii*, 75(3), 203–216. <https://doi.org/10.1070/RC2006v075n03ABEH001205>
10. Boldyrev, V. V. (1983). *Eksperimental'nye metody v mekhanokhimi tverdykh neorganicheskikh veshchestv*. Moskva: Mir.
11. Kosolapova, T. Ya. (1968). *Karbidy*. Moskva: Metallurgiya.
12. Loginov, Yu. N. (1984). *Tekhnologiya polucheniya zagotovok iz tverdogo splava: uchebnoe posobie*. Sverdlovsk: UPI im. S. M. Kirova.
13. Tretyakov, V. I. (1976). *Osnovy metallovedeniya i tekhnologii proizvodstva spechennykh tverdykh splavov*.
14. Rakhimova, A. K., & Galeleyva, A. K. (2019). Metody sinteza litiy zheleza fosfata: mikrovolnovoy sintez – perspektivnyy metod dlya sinteza LiFePO₄. *Chemical Journal of Kazakhstan*, 1(1), 1–10.
15. Morgan, D., Van der Ven, A., & Ceder, G. (2004). Li conductivity in Li_xMPO₄ (M = Mn, Fe, Co, Ni) olivine materials. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 7, 30–32.
16. Franger, S., Bourbon, C., & Le Cras, F. (2004). Optimized lithium iron phosphate for high-rate electrochemical applications. *Journal of The Electrochemical Society*, 151, 1024.
17. Bazhenov, S. V., & Kurlov, A. S. (2022). Effect of mechanical activation and solid-state synthesis temperature on the composition and grain size of tungsten carbide. *AIP Conference Proceedings*, 2466(1).
18. Tsuchida, T., & Morita, N. (2002). Formation of ternary carbide Co₆W₆C by mechanical activation assisted solid-state reaction. *Journal of the European Ceramic Society*, 22(13), 2401–2407.
19. Kariminejad, A., et al. (2014). Mechanically activated synthesis of tungsten carbide nanoparticles from tungsten oxide. *Advanced Materials Research*, 829, 622–626.
20. de Oro Calderon, R., et al. (2013). Synthesis of nanostructured tungsten carbide powders from mechanically activated mixes of tungsten oxide with different carbon sources. In *International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2013. Vol. 1*, 89–94. Gothenburg, Sweden.
21. Oro, R., et al. (2017). Optimizing the synthesis of ultrafine tungsten carbide powders by effective combinations of carbon sources and atmospheres. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 63, 9–16.
22. Savostin, A. V., & Shuray, P. E. (2009). Mekhanokhimicheskaya aktivatsiya v tekhnologii sakharogo proizvodstva. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya*, (1), 59–61.
23. Onishchenko, D. V., & Reva, V. P. (2011). Poluchenie nanoporoshka karbida vol'frama metodom mekhanicheskoy aktivatsii. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, (2), 71–77.

24. Yagofarov, V. Yu. (2019). Mekhanokhimicheskiy sintez karbida vol'frama s ispol'zovaniem ugleroda razlichnogo proiskhozhdeniya. *Metallofizika legkikh splavov*, (186).
25. Yang, R., Wang, Y., Zhang, Y., et al. (2011). Molten salt synthesis of tungsten carbide powder using a mechanically activated powder. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 29(1), 138–140.
26. Aytekin, N. Ö., Ağaoğulları, D., & Öveçoğlu, M. L. (2019). Mechanochemical synthesis of tungsten carbide powders induced by magnesiothermic reduction of WCl_6 and Na_2CO_3 raw materials. *Materials Research Express*, 6(9), 096517.
27. Shichalin, O. O., Kolesnikov, A. A., Kolesnikova, E. A., et al. (2020). SPS hard metal alloy WC-8Ni-8Fe fabrication based on mechanochemical synthetic tungsten carbide powder. *Journal of Alloys and Compounds*, 816, 152547.
28. Klubovich, V. V., Kostyuk, V. A., & Levitskiy, A. V. (2012). Ul'trazvukovaya mekhanoktivatsiya poroshkov, ispol'zuyemykh dlya sinteza elektrokeramicheskikh materialov. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*, (2), 11–16.
29. Agranat, B. A., Kuznetsov, A. Yu., & Lebedev, V. A. (1986). *Ul'trazvuk v poroshkovoy metallurgii*. Moskva: Nauka.
30. Artem'yev, V. V., Klubovich, V. V., & Rubanik, V. V. (2003). *Ul'trazvuk i obrabotka materialov*. Minsk: Ekoperspektiva.
31. Nazarova, A., Mulyukov, R., Rubanik, V., i dr. (2010). Vliyaniye ul'trazvukovykh kolebaniy na strukturu i svoystva ultramelkozernistogo nikelya. *Fizika metallov i metallovedenie*, 110(6), 600–607.
32. Rubanik, V. V., Kostyuk, V. V., & Kostyuk, A. V. (2016). *Ul'trazvukovaya mekhanoktivatsiya poroshkov*.
33. Wang, J., et al. (2023). Ultrasonic-induced grain refinement in laser cladding nickel-based superalloy reinforced by WC particles. *Coatings*, 13(1), 151.
34. Buravlev, I. Y., et al. (2024). Microstructural evolution and mechanical behavior of WC–4wt.% TiC–3wt.% TaC–12wt.% Co refractory cermet consolidated by spark plasma sintering of mechanically activated powder mixtures. *Advanced Powder Technology*, 35(10), 104625.
35. da Silva, E. N., et al. (2021). Investigation of characteristics and properties of spark plasma sintered ultrafine WC–6.4 Fe–3.6Ni alloy as potential alternative WC–Co hard metals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 101, 105669.
36. Schubert, W. D., Weiss, H. J., et al. (2015). Aspects of sintering of cemented carbides with Fe-based binders. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 49, 110–123.
37. Chuvil'deev, V. N., et al. (2014). Sintering of nano- and ultradispersed mechanically activated W–Ni–Fe powders and the manufacture of ultrahigh-strength heavy tungsten alloys. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2014, 215–228.
38. Bazhenov, S. V., & Kurlov, A. S. (2020). Tverdogaznyy sintez karbida vol'frama v vakuume iz mekhanoktivirovannoy smesi vol'frama i ugleroda. V *Sovremennye sinteticheskie metodologii dlya sozdaniya lekarstvennykh preparatov i funktsional'nykh materialov (MOSM 2020)*, 104. Yekaterinburg.
39. Chuvil'deev, V. N., et al. (2023). Effect of mechanical activation time on the density of fine-grained tungsten alloy 90W–7Ni–3Fe, obtained by spark plasma sintering. *Fizika metallov i metallovedenie*, 124(10), 931–938.
40. Abdulmenova, E. V., & Kulkov, S. N. (2020). The studies of the effect of mechanical activation of WC-based powder on its properties. *AIP Conference Proceedings*, 2310(1).
41. Abdulmenova, E. V., Rummyantsev, M. V., & Kulkov, S. N. (2022). Effect of mechanical treatment of powder on the structure and phase composition of hard alloys. *AIP Conference Proceedings*, 2509(1).
42. Li, X., et al. (2010). WC–8Co–2Al (wt%) cemented carbides prepared by mechanical milling and spark plasma sintering. *Materials Science Forum*, 638, 1817–1823.

Авторлар туралы мәліметтер

№	Аты-жөні, ғылыми дәрежесі, жұмыс немесе оқу орны, қала, ел, автордың e-mail мекенжайы, ұялы телефон нөмірі
1	Курбанбеков Ш.Р. – PhD, қауымдастырылған профессор, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан, e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz
	Kurbanbekov Sh.R. –PhD, associate professor, Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz
	Курбанбеков Ш.Р. – PhD, ассоциированный профессор, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан, e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz
2	Эртаев Н.С. – магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан

	к., Қазақстан, e-mail: nursultan.ertayev@ayu.edu.kz
	Ertayev N.S. – master student, Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, e-mail: nursultan.ertayev@ayu.edu.kz
	Эртаев Н.С. – магистрант, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан, e-mail: nursultan.ertayev@ayu.edu.kz
3	Айдарова М.Т. – докторант, Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан, e-mail: maidarova@ektu.kz
	Aydarova M.T. – PhD student, East Kazakhstan Technical University named after Daulet Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: maidarova@ektu.kz
	Айдарова М.Т. – докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: maidarova@ektu.kz
4	Қожахметов Е.А. — PhD, доктор, Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің VERITAS артықшылық орталығының жетекшісі, Өскемен қ., Қазақстан, e-mail: ykozhakhmetov@edu.ektu.kz
	Kozhakhmetov E.A. – PhD, East Kazakhstan Technical University named after Daulet Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: ykozhakhmetov@ektu.kz
	Қожахметов Е.А. – PhD, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: ykozhakhmetov@ektu.kz
5	Амангельдиева Ю.О. - магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан, e-mail: yulduz.amangeldiyeva@ayu.edu.kz
	Amangeldieva Y.O. – master's student, International Kazakh-Turkish University named after Khoja Ahmet Yassawi, Turkestan, Kazakhstan; e-mail: yulduz.amangeldiyeva@ayu.edu.kz
	Амангельдиева Ю.О. – магистрант, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмета Ясави, г. Туркестан, Казахстан; e-mail: yulduz.amangeldiyeva@ayu.edu.kz