



DOI 10.51885/1561-4212_2025_4_71
FTAXP 53.39.01

WC-Fe ҰНТАҚТАРЫНЫҢ МОРФОЛОГИЯСЫ ЖӘНЕ ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМЫНА МЕХАНОАКТИВАЦИЯНЫҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНОАКТИВАЦИИ НА МОРФОЛОГИЮ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ WC-Fe ПОРОШКОВ

STUDY OF THE INFLUENCE OF MECHANOACTIVATION ON THE MORPHOLOGY AND PHASE COMPOSITION OF WC-Fe POWDERS

Ш.Р. Курбанбеков ¹, Ю.О. Амангельдиева ^{1*}, М.Т. Айдарова ², А.С. Қизатов ²

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

²Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Амангельдиева Юлдуз Ойбекқызы,

e-mail: yulduz.amangeldiyeva@ayu.edu.kz

Түйінді сөздер:

механоактивация,
WC-Fe ұнтақтары,
фазалық құрам,
микроқұрылым,
дән өлшемі.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл жұмыс дәстүрлі WC-Co материалдарына балама ретінде қарастырылатын перспективалы WC-Fe негізіндегі ұнтақтардың морфологиясы мен фазалық құрамына механоактивация (МА) үдерісінің әсерін зерттеуге арналған. 88 масс.% WC–12 масс.% Fe және 95 масс.% WC–5 масс.% Fe құрамындағы композиттер планеталық диірменде (500 айн/мин) 1, 2 және 4 сағат бойы өңделді. Ұнтақтар СЭМ, рентгендік дифракция (XRD) және лазерлік дифракция әдістерімен сипатталды. 1-2 сағаттық МА нәтижесінде кристаллиттердің ұсақталуы (~220 Å), аморфталуы және ақаулар тығыздығының артуы байқалды. Fe мөлшері жоғары болған жағдайда W₂C фазасы түзіліп, агрегация азаяды, ал 95 % WC жүйесінде агломерация мен спекание үрдістері күшейеді. Ең тиімді құрылымдық сипаттамалар 1-2 сағат өңдеу кезінде алынады. Бұл нәтижелер құрылымдық эволюцияның құрам мен МА ұзақтығына тәуелділігін көрсетеді және кобальтсыз қатты қорытпаларды дайындау параметрлерін оңтайландыруға негіз бола алады.

Ключевые слова:

механоактивация, WC-Fe
порошки, фазовый
состав, микроструктура,
размер зерен.

АННОТАЦИЯ

Настоящая работа посвящена исследованию влияния механоактивации (МА) на морфологию и фазовый состав порошков WC-Fe перспективной альтернативы традиционным WC-Co материалам. Изучены композиции 88 мас.% WC–12 мас.% Fe и 95 мас.% WC–5 мас.% Fe, обработанные в планетарной мельнице (500 об/мин) в течение 1, 2 и 4 часов. Порошки характеризованы методами СЭМ, XRD и лазерной дифракции. Установлено, что уже через 1-2 ч МА наблюдаются измельчение кристаллитов (~220 Å), аморфизация и рост плотности дефектов. При повышенном содержании Fe происходит формирование фазы W₂C и снижение агрегации, тогда как система с 95 % WC склонна к агломерации и спеканию. Оптимальные характеристики достигаются при 1–2 ч обработки. Результаты демонстрируют критическую зависимость структурной эволюции от состава и длительности МА и могут служить основой



для оптимизации параметров подготовки кобальт-свободных твёрдосплавных материалов.

Keywords:

mechanical activation,
WC-Fe powders,
phase composition,
microstructure, grain size.

ABSTRACT

This work is devoted to the investigation of the effect of mechanical activation (MA) on the morphology and phase composition of WC-Fe powders, a promising alternative to traditional WC-Co materials. The compositions of 88 wt.% WC–12 wt.% Fe and 95 wt.% WC–5 wt.% Fe processed in a planetary mill (500 rpm) for 1, 2 and 4 hours were studied. The powders were characterized by SEM, XRD and laser diffraction. It was found that after 1-2 h of MA, crystallite refinement (~220 Å), amorphization and an increase in the defect density are observed. At an increased Fe content, the W₂C phase is formed and aggregation decreases, whereas the system with 95% WC is prone to agglomeration and sintering. Optimum characteristics are achieved after 1-2 h of processing. The results demonstrate the critical dependence of structural evolution on the composition and duration of MA and can serve as a basis for optimizing the parameters for the preparation of cobalt-free carbide materials

КІРІСПЕ

WC-Co цементтелген карбидтері машина жасау, қорғаныс және аэроғарыш өнеркәсібі сияқты стратегиялық салаларда базалық материалдар ретінде кең қолданылады (Kumar, Kariminejad & Antonov, 2023; Gao et al., 2020). Олардың бірегей қасиеттері дисперсті WC фазасы мен кернеулерді қайта бөлуді және тұтастықты қамтамасыз ететін иілімді Co байланыстырғышының үйлесуімен айқындалады (García, Blomqvist & Llanes, 2019; Zeiler, 2019; Lyu et al., 2020). Соңғы жылдары кобальтпен байланысты тәуекелдер өндірістің геосаяси шоғырлануы (өндірудің >70 %-ы ДР Конгода), баға құбымалылығы, аккумулятор индустриясымен бәсеке, сондай-ақ токсикологиялық және радиологиялық қауіптер WC-Co жүйелерін сын тұрғысынан қайта қарауға негіз болды (Ravotti, Correias & Luis, 2024; Fathipour et al., 2024). Атап айтқанда, Co қосылыстары әлеуетті канцерогендер ретінде жіктеледі; нейтрондық сәулелену жағдайында ⁶⁰Co радионуклиді түзіліп, мұндай композиттердің реакторлық және биомедициналық ортада қолданылуын шектейді. Осыған сәйкес, кобальтты алмастыратын цементтелген карбидтерді әзірлеу өзекті міндетке айналды (Krawitz & Drake, 2015; Yang et al., 2020).

Осы баламалардың ішінде жақсы ылғалданғыштық, фазалық эволюцияны басқару мүмкіндігі, экологиялық қауіпсіздік және қолжетімділік қасиеттерін біріктіретін WC-Fe жүйелері айрықша қызығушылық тудырады (Gruber et al., 2023; Lima et al., 2024; Sten et al., 2025). Мұндай композиттер қышқылды орталардан термохимиялық ортаға дейінгі агрессивті жағдайларда перспективті (Jayaraj et al., 2023; Cramer et al., 2020; Steinlechner et al., 2022). Дегенмен, олардың іске асырылуы интерфазалық реакциялар мен интерметаллидтердің түзілуіне байланысты ғылыми сын-қатерлермен қатар жүреді; бұл құбылыстар беріктік сипаттамаларын арттыруы да, төмендетуі де мүмкін (Sun, Huang & Zhao, 2021; Lamelas et al., 2024; Parupov et al., 2018).

Алдын ала активтеудің тиімді тәсілдерінің бірі — планеталық диірмендерде жүзеге асырылатын механоактивация (MA) (Gao et al., 2020; Zeiler, 2019). Ол ұнтақтарды ұсақтаумен қатар, жергілікті химиялық түрленулерді индукциялайды, оксидтік қабықшаларды бұзады, ақаулар түзеді және метастабильді фазалардың пайда болуына жағдай жасайды (Pan et al., 2019; Fathipour et al., 2024). Нәтижесінде агломерациялану қабілеті мен материалдың кешенді қасиеттері жақсарады. Алайда MA жағдайында WC-Fe жүйелерінің құрылымдық және фазалық эволюциясы әлі толық зерттелмеген.



Осы жұмыс МА-дан кейінгі WC-Fe ұнтақтарының морфологиясы мен фазалық құрамын кешенді зерттеуге бағытталған; айналу жылдамдығы тұрақты болғанда стехиометрияның әсеріне басымдық беріледі.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

Бұл жұмыста зерттелген ұнтақ қоспалары Hebei Suoyi New Material Technology (Hebei Province, China) компаниясынан алынған, тазалығы 99 % және бөлшек өлшемдері <50 мкм болатын элементтік WC және Fe ұнтақтарынан дайындалды. Өндірушінің техникалық паспортына сәйкес, бастапқы ұнтақтардың бөлшек өлшемі <30 мкм болған. Вольфрам карбитінің микрондық ұнтақтарын қолдану алынатын қатты қорытпалардың беріктік сипаттамаларын арттыра алатын майда дәнді құрылым қалыптастыру қажеттілігімен негізделді. Зерттеуде химиялық құрамы әртүрлі екі қоспа салыстырылды: 88 масс.%WC-12 масс.% Fe және 95 масс.%WC-5 масс.% Fe. Механоактивация (МА) бойынша жүргізілген эксперименттердің шарттары 1-кестеде келтірілген.

1-кесте. WC-Fe қоспалары үшін МА режимдері

| Үлгі атауы | Уақыт, мин | ПАҚ (стеарин қ-сы), масс.% | Айналу жылд., айн/мин | Орта | Масс. қатынасы (шар/ұнтақ) |
|-----------------------------|------------|----------------------------|-----------------------|-------|----------------------------|
| Алдын ала араластыру | 20 | - | 200 | Аргон | 10:1 |
| МА | | | | | |
| 88масс.%WC-12масс.% Fe | 60 | 2.5 | 500 | Аргон | 10:1 |
| | 120 | | | | |
| | 240 | | | | |
| 95масс.%WC-5 масс.% Fe | 60 | 2.5 | | | |
| | 120 | | | | |
| | 240 | | | | |
| Ескерту – автор құрастырған | | | | | |

МА-ға дейін WC және Fe ұнтақтары алдын ала дозаланып, болат шарларды пайдаланып 200 айн/мин жылдамдықта 20 минут бойы араластырылды, бұл компоненттердің біркелкі таралуын қамтамасыз етті. Одан кейін қоспа ұнтақтаушы шарлармен бірге ұнтақтайтын стақандарға (шар:ұнтақ = 10:1) салынып, планеталық микродиірменде Pulverisette 7 Premium line (Fritsch GmbH) құрылғысында 500 айн/мин жылдамдықта өңделді. Таңдалған қатынас пен режим қызып кетусіз және агломерациясыз тиімді ұсақтауды қамтамасыз етеді және әдебиет деректерімен үйлеседі. Стақанның айналу жылдамдығы 500 айн/мин деңгейінде орнатылып, бұл МА-ны қызып кету және бақыланбайтын СВС реакциясы қаупінсіз тиімді жүргізуге мүмкіндік беретін оңтайлы мән болып табылады. Мұндай режим бөлшектерді ұсақтау мен легірлеуге жеткілікті соққы энергиясын қамтамасыз етеді және температураны тұрақты диапазонда ұстайды. Ұнтақтарды жүктеу инертті аргон атмосферасында VGB-3С вакуумдық қолғап қорабында жүргізілді. Әр тәжірибе үшін 9 г қоспа 45 мл көлемді болат ұнтақтау стақандарына салынды, ал шарлар материалы ретінде жоғары тығыздығы, беріктігі және қолжетімділігі себепті тот баспайтын болат таңдалды.

Ұнтақтау уақытының әсері 1, 2 және 4 сағат өңдеу ұзақтығында зерттелді. ПАҚ ретінде стеарин қышқылы 2,5 және 3 масс.% концентрацияларында қолданылды. 2,5 % қосу агломерация мен «суық дәнекерленуді» тиімді түрде болдырмайды әрі металдық



компоненттердің біркелкі таралуына жәрдемдеседі. Ұнтақтаудың ұзақ режимдерінде агрегация қаупі артатындықтан, концентрацияны 3 %-ға дейін көтеру орынды.

Морфология жоғары айырымдылықты СЭМ-де (Tescan Mira) зерттелді; фазалық құрам рентгендік дифракция әдісімен анықталды ($X^{\text{Pert}}\text{PRO}$, $\text{CuK}\alpha$, $2\theta = 20\text{-}90^\circ$, қадам $0,020^\circ$, 40 мА, 45 кВ). Гранулометриялық талдау лазерлік дифракция әдісімен (Analysette-22 NeXT Nano, Fritsch) жүргізілді; агломераттарды бұзу және бөлшектердің шынайы таралуын алу үшін өлшеу сұйық ортада ультрадыбыспен іске асырылды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

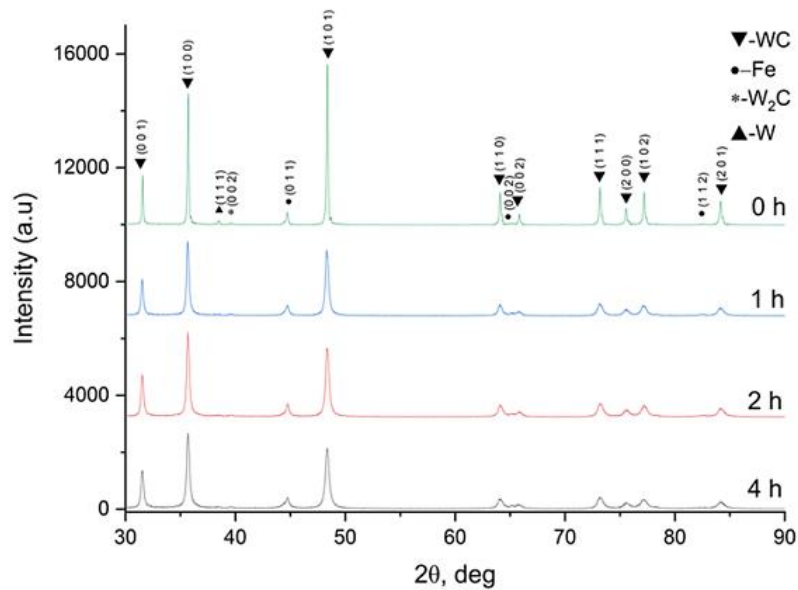
WC-Fe ұнтақ композицияларындағы стехиометриялық қатынастарды ұтымды таңдау, атап айтқанда 88 масс.% WC–12 масс.% Fe және 95 масс.% WC–5 масс.% Fe, қаттыфазалық өзара әрекеттесулердің термодинамикалық және кинетикалық қырларымен қатар, интенсивті механоактивация жағдайында фазатүзілу тетіктерін айқындау қажеттілігімен негізделеді. Бұл тәсіл жоғарыэнергетикалық әсер кезінде карбидтік матрицадағы реакцияға қабілетті металдық компоненттің концентрациясына тәуелді фазалық құрам эволюциясын жүйелі зерттеуге бағытталған. WC-Fe жүйесі W_2C типті фазалардың және Fe-WC қатты ерітінділерінің түзілуімен жүретін механохимиялық қаттыфазалық реакцияларға бейімділік танытады, мұнда Fe тотықсыздандырғыш әрі пластификатор ретінде әрекет етіп, интерфазалық диффузияны белсендіреді. 12 масс.% Fe (88 масс.% WC) кезінде күшейтілген интерфазалық өзара әрекеттесу есебінен фазалық түрленуді қамтамасыз ететін сыңдарлы (критикалық) қатынасқа қол жеткізіледі. Ал 5 масс.% Fe (95 масс.% WC) құрамы металдық компонент тапшылығы салдарынан реакциялық белсенділігі шектеулі режимді модельдейді, мұнда W_2C түзілуі тежеледі. Таңдалған қатынастар WC-Fe жүйесіндегі реакциялық қабілеттіліктің екі шекті күйін көрсетеді және Fe мөлшерінің механохимиялық трансформация мен фазалық эволюцияға ықпалын айқындауға мүмкіндік береді бұл тозуға төзімді карбидтік композиттерді құрастырудағы шешуші фактор.

Рентгенодифрактограмма (1, а-сурет) WC-Fe жүйесінің 0, 1, 2 және 4 сағат бойы механикалық легірленуі кезіндегі фазалық эволюциясын көрсетеді. Бастапқы күйде (0 сағ) гексагондық WC фазасының (001), (100), (101), (110), (102) жазықтықтары бойынша интенсивті рефлекстер, сондай-ақ α -Fe-нің (ОЦК құрылым) әлсіз шыңдары тіркеледі. Өңдеу уақыты артқан сайын WC шыңдарының интенсивтілігі төмендейді, бұл кристалдылықтың деградациялану, ұсақталуды және ақаулардың жиналуын білдіреді. 1 сағаттан кейін аморфталуды меңзейтін диффузды рефлекстер байқалады. Fe шыңдары сақталғанымен, айқындылығы кемиді. 4 сағаттық өңдеудің соңында WC шыңдарының ені айтарлықтай кеңейіп, Fe кристалдылығы жойылады, бұл интенсивті механоактивация жағдайында қаттыфазалық өзара әрекеттесудің дамуын айғақтайды.

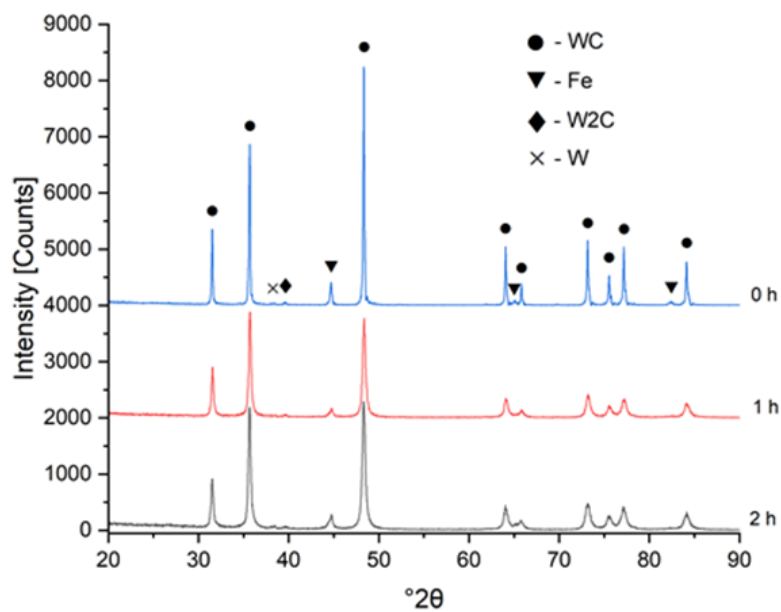
95 масс.% WC–5 масс.% Fe құрамды қоспаның рентгендік дифрактограммаларында да MA-ның фазалық эволюцияға ықпалы байқалады (1, б-сурет). Ұнтақтардың жабысуы мен агломерациялануына байланысты 4 сағаттық өңдеуде үлгілерді алу мүмкін болмағандықтан, мәліметтер тек 1 және 2 сағат MA кейінгі күй үшін алынды. Бастапқы үлгі айқын WC шыңдардан және α -Fe-нің әлсіз рефлекстерін көрсетеді. Темірдің аз мөлшері аясында Fe төмен интенсивті жалғыз шың түрінде тіркеледі, бұл фазалық талдауды оның өзгерістеріне сезімтал етеді. Активтеу уақыты 2 сағатқа ұлғайған кезде WC пен Fe шыңдардан интенсивтілігі төмендейді, алайда W_2C фазасы 12 масс.% Fe жүйесіне қарағанда әлсізрек және кейінірек көрінеді. Бұл Fe мөлшерінің аздығынан компоненттердің жанасуы шектеулі болып, өзара әрекеттесудің бәсеңдейтінін көрсетеді. Кристалдылық төмендегеніне қарамастан, 2 сағат аралық фазалардың айтарлықтай



мөлшерде түзілуі үшін жеткіліксіз, бұл қаттыфазалық түрленулер кинетикасына стехиометрияның ықпалын айқындайды.



а



б

1-сурет. МА уақытына байланысты ұнтақ қоспасының XRD үлгілері (0, 1, 2 және 4 сағ)
а – 88 % мас. WC- 12% мас. Fe; б – 95 % мас. WC- 5 % мас. Fe

Ескерту – автор құрастырған

Салыстырмалы талдау екі жүйеде де бастапқы фазалық құрамды WC-тің басымдылығы сипаттайтынын, ал α -Fe фазасының айқындылығы оның массалық үлесіне сәйкес келетінін көрсетеді. 88 масс.% WC-12 масс.% Fe қоспасында компоненттердің өзара әрекеттесуі қарқынды, бұл W_2C фазасының МА-ның 2 сағатынан кейін-ақ пайда болуымен дәлелденеді; бұл Fe мөлшері жоғары болғанда реакциялық қабілеттің артаатынын білді-



реді. Керісінше, 95 масс.% WC-5 масс.% Fe жүйесінде W₂C түзілуі кейінірек және аз көлемде байқалады, бұл бөлшектер арасындағы жанасу ықтималдығының төмендігімен және темірдің аз мөлшерінде диффузияны белсендіруге энергияның жеткіліксіздігімен түсіндіріледі.

Ұнтақтарда МА үдерісі барысында жүретін құрылымдық өзгерістерді сандық сипаттау үшін доминант фазалардың кристаллит өлшемдері (2-кесте) есептелді. Есептеу рентгендік дифракциялық шыңдардың параметрлерін талдауға негізделген Шеррер теңдеуі бойынша жүргізілді:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}$$

мұнда D – кристаллит өлшемі; K – пішін коэффициенті; λ – рентген сәулесінің толқын ұзындығы; β – шыңның жарты биіктіктегі толық ені (FWHM); θ – дифракция бұрышы.

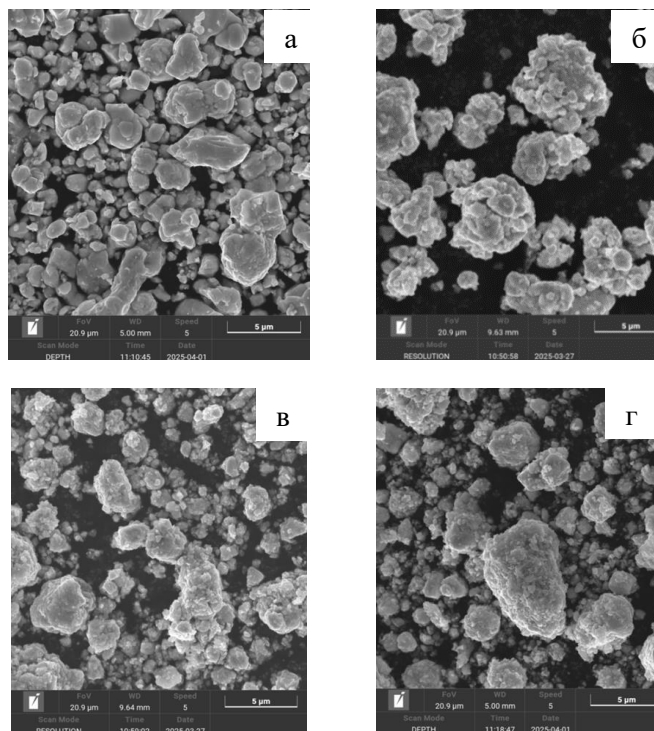
2-кесте. МА уақытына байланысты кристаллит өлшемдері (нм)

| Үлгілер | 0 сағ | 1 сағ | 2 сағ | 4 сағ |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 88масс.%WC-12масс.% Fe | 54,53 | 31,92 | 25,52 | 22,61 |
| 95масс.%WC-5 масс.% Fe | 55,64 | 25,57 | 21,15 | – |

Ескерту – автор құрастырған

Кесте деректерін талдау барлық зерттелген композициялар үшін МА ұзақтығы артқан сайын кристаллит өлшемдерінің тұрақты түрде кему үрдісін көрсетеді. Алдын ала араластыру сатысына сәйкес келетін бастапқы күйде кристаллит өлшемдері 54,5–55,6 нм шегінде өзгереді. Бар болғаны бір сағаттық механохимиялық өңдеуден кейін олардың мәні 1,5-2 есе төмендейді, бұл бастапқы кристалдық тордың қарқынды бұзылуы мен нанокұрылымды күйлердің түзіле бастағанын білдіреді. Мұндай өзгерістер дифракциялық максимумдардың айтарлықтай ұлғаюымен (уширение) және микродеформациялардың артуымен корреляцияланады; бұл кристалдық тордағы ақаулар тығыздығының өсуін, сондай-ақ фазалық құрамның диспергирлену дәрежесінің ұлғаюын бейнелейді. Осылайша алынған деректер МА кезінде фазалық түрленулер кинетикасында қоспа құрамының шешуші рөл атқаратынын көрсетеді. Темірдің мөлшерін арттыру W₂C сияқты екіншілік карбидтік фазалардың түзілуін айтарлықтай жеделдетіп, интенсификацияланады; бұл берілген сипаттамалары бар композициялық ұнтақтарды жобалауда ескерілуі тиіс.

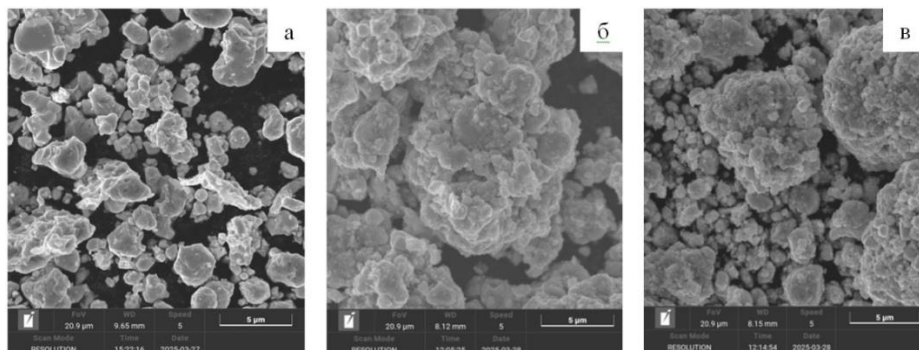
88 масс.%WC-12 масс.% Fe қоспасының СЭМ-бейнелері 2-суретте көрсетілген. Бастапқы күйде (2, а-сурет) тегіс беткейлі және жоғары кеуектілігі бар тығыз WC агломераттары басым, бұл интерфазалық өзара әрекеттесудің жоқтығын меңзейді; Fe ықтимал түрде дисперсті кіріктірмелер түрінде таралған. 1 сағаттан кейін (2, б-сурет) дезагломерация белгілері, орташа бөлшек өлшемінің кемуі, ұсақдисперсті фрагменттер үлесінің артуы және беттердің кедір-бұдырлануы байқалады; бұлар бастапқы активация мен ақаулардың жиналуын көрсетеді. 2 сағатта (2, в-сурет) құрылым біртектіленіп, интенсивті деформациялық әсерге тән дамыған морфологиясы бар субмикрондық және нанобөлшектер басым болады. 4 сағатқа қарай (2, г-сурет) ішінара коалесценция және суық дәнекерлену белгілері бар тығыз флокулдарға агрегацияланумен сипатталатын нанодисперсті құрылым қалыптасады. Бұл кезеңдегі агломерацияның өсуі жүйенің ақаулармен қанығуымен және беттік энергияның төмендеуімен түсіндірілуі мүмкін.



2-сурет. 88 масса% WC-12 масс.% Fe ұнтақ қоспасының SEM суреттері әртүрлі МА уақыттарынан кейін: а – бастапқы ұнтақ қоспасы; б – 1 сағаттан кейін; в – 2 сағаттан кейін; г – 4 сағаттан кейін

Ескерту – авторлар құрастырған

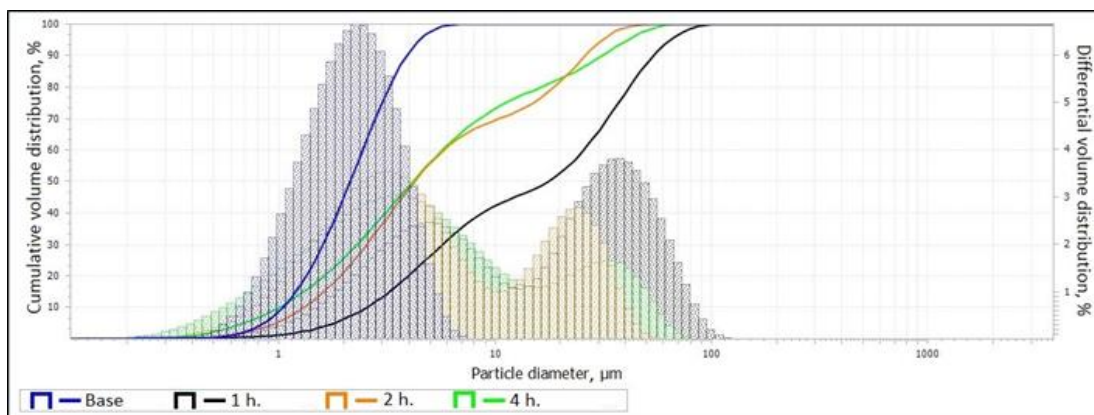
Морфологиялық айырмашылықтар WC-тің массалық үлесі әртүрлі композициялар арасында айқын көрінеді. 88 масс.% WC кезінде оқшауланған субмикрондық және микробөлшектердің (<5 мкм) басымдығымен сипатталатын неғұрлым гомогенді дисперсті құрылым түзіледі, бұл механоактивация барысында тиімді фрагментация мен морфологияның тұрақтануын бейнелейді. Керісінше, 95 масс.% WC кезінде өңдеудің 2 сағатынан-ақ үлкейген агломераттар мен түйіршікаралық шекаралардың түзілуімен біріктіру және ішінара агломерация байқалады (3-сурет). Аталған морфологиялық ерекшеліктер лазерлік дифракция нәтижелерімен үйлеседі және жоғары реакциялық белсенділік жағдайында ең жоғары диспергирлену дәрежесі МА 2 сағаттан аспаған кезде, әсіресе қатты фаза мөлшері төмен жүйелерде, қол жеткізілетінін растайды.



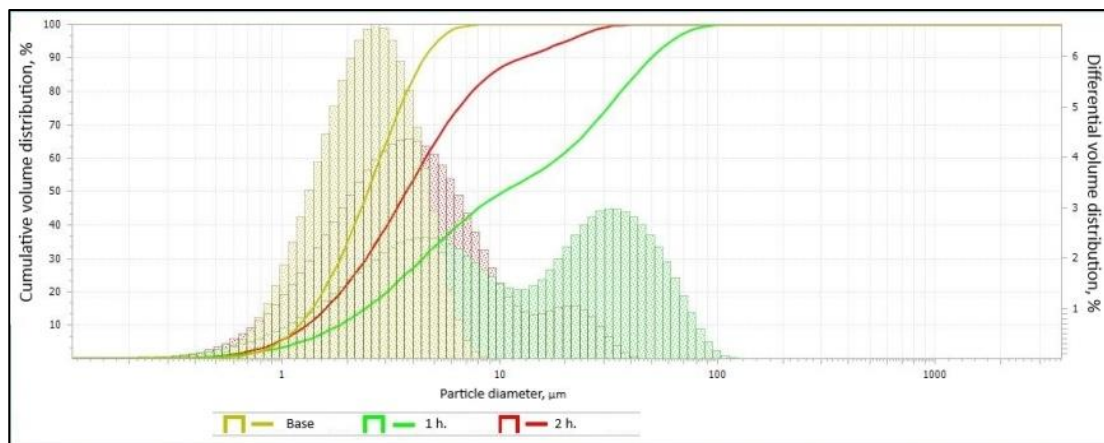
3-сурет. 95 мас.% WC-5 мас.% Fe ұнтақ қоспасының SEM суреттері әр түрлі МА уақыттарынан кейін: а) бастапқы ұнтақ қоспасы; б) 1 сағаттан кейін; в) 2 сағаттан кейін

Ескерту – автор құрастырған

4, а-суретте 1, 2 және 4 сағат бойы МА-дан кейінгі 88 масса% WC-12 масса% Fe қоспасының дифференциалды және интегралдық бөлшектер көлемінің таралулары көрсетілген. Бастапқы күйде модальді өлшем ~ 35 мкм, «құйрығы» 60 мкм-ге дейін ұзарғаны байқалады. 1 сағат өңдеуден кейін үлестірім ұсақ бөлшектер аймағына ығысады (шың 8,3 мкм), орташа өлшем 4,42 мкм; бұл пластикалық деформация мен беттік энергияның өсуі салдарынан жүретін агрегациямен қатар жүретін белсенді фрагментацияны көрсетеді. 2 сағатта орташа өлшем өзгермейді (4,31 мкм), бұл ұсақталу мен агломерация арасындағы бәсекелестікті білдіреді. 4 сағаттан кейін таралу бірқалыптырақ болып, модальді өлшем $\sim 2,8$ мкм қалыптасады, алайда субмикрондық бөлшектердің қайта агломерациялануы және диспергирленудің квазистационар күйіне жетуі есебінен көлемдік орташа диаметр 17,14 мкм-ге дейін өседі. 95 масс.% WC жүйесінде ұзақ (4 сағ) МА қарқынды адгезиямен және жартылай агломерациямен қатар жүрдіктен талдау шектелді. 1 және 2 сағат аралықтары үшін D50 мәндері тиісінше 5,21 және 4,89 мкм құрады.



а



б

4-сурет. МА-дан кейін жүйе бөлшектерінің бимодальды таралуы:

а – 88 мас.% WC-12 мас.% Fe; б – 95 мас.% WC-5 мас.% Fe

Ескерту – автор құрастырған

Алынған деректерді талдау көрсеткендей, МА процесінде ең жоғары тұрақтылықты 88 масс.% WC-12 масс.% Fe ұнтақ композициясы танытады, ал вольфрам карбидінің үлесі жоғарылатылған жүйе (95 масс.% WC-5 масс.% Fe) 2 сағаттан аса ұнтақтау ұзақтығында



жабысу, агрегация және ішінара агломерациялану айқын бейімділікпен сипатталады. Металдық байланыстырушының үлесін арттыру бөлшектердің неғұрлым тиімді диспергирленуіне және жүйенің пластикалығы жақсаруы есебінен агломерация ықтималдығының төмендеуіне алып келетіні анықталды. Осылайша, біртекті дисперсті ұнтақты, ұлағуға ең төмен бейімділікпен қалыптастыратын МА оңтайлы уақыт аралығы 1-2 сағат деп есептелуі тиіс.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген кешенді талдау WC-Fe жүйелеріндегі фазалық түрленулер мен морфологиялық өзгерістердің сипаты металдық байланыстырғыштың табиғатына және МА ұзақтығына айтарлықтай тәуелді екенін көрсетті. Рентгенодифракциялық талдау механикалық легірлеу уақыты артқан сайын WC-Fe жүйесінде α -Fe фазасының жойылып, W₂C карбидтік фазасының түзілуін айқындады, бұл интенсивті механикалық әсер жағдайында темірдің жоғары химиялық белсенділігін білдіреді. СЭМ бойынша микроструктураны талдау осы қорытындыларды растады: уақыт ұзарған сайын WC-Fe жүйесінде ірі агломерациядан нанодисперсті құрылымға өту байқалады, сонымен қатар суық дәнекерлену мен флокуляция белгілері көрінеді. Гранулометриялық талдау нәтижелері орташа бөлшек өлшемінің кемуін растады. WC-Fe үшін максималды диспергирлену төрт сағатқа таман байқалады (модальді өлшем шамамен 2,8 мкм). Демек, тиімді ұсақтау мен ұнтақтардың технологиялық қасиеттерін сақтау арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз ету үшін МА оңтайлы ұзақтығы 1-2 сағат аралығы болып табылады. Бұл уақыттық шектен асып кету қалаусыз агрегациялық құбылыстардың күшеюіне және материалдың кейінгі қолдануға жарамдылығының төмендеуіне әкеледі. Алынған нәтижелер WC негізіндегі қаттықорытпа және композициялық материалдарды әзірлеуде МА параметрлерін ұтымды таңдауға маңызды негіз болып табылады.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор(лар) мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл мақала «Қазақстан Республикасының өңдеу өнеркәсібін инновациялық дамыту үшін технологиялар мен материалдарды әзірлеу» атты BR24992925 тақырыбы бойынша Ғылым және жоғары білім министрлігінің ғылыми зерттеулерге арналған гранттық қаржыландыру жобасы аясында дайындалды».

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Cramer, C. L., Shichalin, O. O., Papynov, E. K., et al. (2020). WC-based alloys with Fe/Ni matrix: Microstructure and mechanical properties. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 92, Article 105280. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105280>
- Fathipour, Z., Javanbakht, M., Rezaei, M., et al. (2024). Effect of binder on oxidation properties of tungsten carbides: A review by a conceptual classification approach. *Ceramics*, 7(1), 166–191. <https://doi.org/10.3390/ceramics7010010>
- Gao, Y., Gao, K., Fan, L., Yang, F., Guo, X., Zhang, R., & An, L. (2020). Oscillatory pressure sintering of WC-Fe-Ni cemented carbides. *Ceramics International*, 46(8), 12727–12731. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.199>
- García, J., Blomqvist, A., & Llanes, L. (2019). Cemented carbide microstructures: A review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 80, 40–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.12.004>
- Gruber, P. H., Katea, S. N., Westin, G., & Akhtar, F. (2023). WC-Ni cemented carbides prepared from Ni nano-dot coated powders. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 117, Article 106375. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106375>
- Jayaraj, J., Elo, R., Surreddi, K. B., & Olsson, M. (2023). Electrochemical and passivation behavior of a corrosion-resistant WC-Ni(W) cemented carbide in synthetic mine water. *International Journal of*



- Refractory Metals and Hard Materials, 114, Article 106227.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106227>
- Krawitz, A., & Drake, E. (2015). Residual stresses in cemented carbides — An overview. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 49, 27–35.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.07.018>
- Kumar, R., Kariminejad, A., Antonov, M., Goljandin, D., Klimczyk, P., & Hussainova, I. (2023). Progress in sustainable recycling and circular economy of tungsten carbide hard metal scraps for Industry 5.0 and onwards. *Sustainability*, 15(16), 12249. <https://doi.org/10.3390/su151612249>
- Lamelas, V., Rolland, M. B., Toller-Nordström, L., et al. (2024). Broadening of the carbon window and the appearance of core–rim carbides in WC–Fe/Ni cemented carbides. *Journal of Alloys and Compounds*, 999, Article 175078. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.175078>
- Lima, M. J., Silva, F. E., Raimundo, R. A., et al. (2024). Enhanced properties of hard metal WC–Ni processed from nanostructured powders. *Ceramics International*, 50(22), 47445–47455. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.03.187>
- Lyu, X., Jiang, X., Sun, H., & Shao, Z. (2020). Microstructure and mechanical properties of WC–Ni multiphase ceramic materials with NiCl₂•6H₂O as binder. *Nanotechnology Reviews*, 9(1), 543–557. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0044>
- Pan, Y., Wang, H., & Fang, Z. Z. (2019). Microstructure and properties of spark plasma sintered WC–Fe composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 783, 723–731. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.013>
- Papynov, E. K., Shichalin, O. O., & Buravlev, I. Y. (2018). Spark plasma sintering of functional ceramics: A review. *Glass Physics and Chemistry*, 44(6), 589–596. <https://doi.org/10.1134/S1087659618060140>
- Ravotti, D. A. S., Correias, H. M., & Luis, N. C. (2024). Last decade insights on cemented carbides: A review on alternative binders, new consolidation techniques and advanced characterization. *Eclética Química*, 49. <https://doi.org/10.29047/eq.v49i0.1085>
- Shichalin, O. O., Buravlev, I. Y., Papynov, E. K., et al. (2020). Comparative study of WC-based hard alloys fabrication via spark plasma sintering using Co, Fe, Ni, Cr, and Ti binders. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 102, Article 105725. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105725>
- Steinlechner, R., de Oro Calderon, R., Koch, T., et al. (2022). A study on WC–Ni cemented carbides: Constitution, alloy compositions and properties, including corrosion behaviour. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 103, Article 105750. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105750>
- Sten, S., Odqvist, J., Norgren, S. M., & Hedström, P. (2025). Functional-gradient WC–TiC cemented carbides with alternative binders (Ni and Fe). *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Article 107214. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2024.107214>
- Sun, J., Huang, Z., & Zhao, J. (2021). High-hard and high-tough WC–TiC–Co cemented carbide reinforced with graphene. *Materials Today Communications*, 29, Article 102841. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102841>
- Yang, Y., Zhang, C., Wang, D., et al. (2020). Additive manufacturing of WC–Co hardmetals: A review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 108, 1653–1673. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105652>
- Zeiler, B. (2019). Tungsten and cobalt, the two key elements of the hardmetal industry. 11th International Conference on Science of Hard Materials, Khao Lak.



Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Курбанбеков Шерзод Рустамбекович – PhD, профессор, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан

Курбанбеков Шерзод Рустамбекович – PhD, профессор, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан

Kurbanbekov Sherzod Rustambekovich – PhD, Professor, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5510-0568>



Амангелдиева Юлдуз Ойбекқызы – магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан

Амангельдиева Юлдуз Ойбекқызы – магистрант, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмета Ясави, г. Туркестан, Казахстан

Amangeldieva Yulduz Oybekkyzy – master's student, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan

e-mail: yulduz.amangeldiyeva@ayu.edu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5440-8722>



Айдарова Мадина Тұрсынбекқызы – докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Айдарова Мадина Тұрсынбековна – докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Aidarova Madina Tursynbekovna – PhD student, D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

e-mail: maidarova@ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9200-8058>



Қизатов Айбар Советбекұлы – Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Veritas» ғылыми-зерттеу орталығының ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан

Кизатов Айбар Советбекович – научный сотрудник Научно-исследовательского центра «Veritas» Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Kizatov Aibar Sovetbekovovich – Researcher of the Research Center «Veritas» of the East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: akizatov@ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6627-9742>