Нурила Муратовна Бурабаева – қауымдастырылған профессор, Металлургия және кен байыту институты, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: nuri_eng@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2183-2239.

Таншолпан Казыбеккызы Сагынтаева – младший научный сотрудник, магистр, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан; e-mail: tsagyntayeva00@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5922-4172.

Нұржан Орақбай – инженер, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті докторанты, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: n.orakbay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6043-0936.

Information about the authors

Nazym Kanatovna Akhmadiyeva* – Associate Professor, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan; e-mail: akhmadiyeva141@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3154-9816.

Yerkezhan Baimuratovna Abikak – phD, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan; e-mail: abikak.erkezhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8705-4092.

Nurila Muratovna Burabayeva – Associate Professor, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan; e-mail: nuri_eng@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2183-2239.

Tangsholpan Kazybekkyzy Sagyntayeva – junior researcher, master degree, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan; e-mail: tsagyntayeva00@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5922-4172.

Nurzhan Orakbay – Engineer of Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan, Doctoral student of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: n.orakbay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6043-0936.

Поступила в редакцию 05.06.2026
Поступила после доработки 20.08.2026
Принята к публикации 24.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-85

ҒТАХР: 61.31.43

Д. Мұқталы[1,2*], Б.Х. Мусабаева[3], А. Батқал[1], Қ. Қамұнұр[1], А. Абылайхан[2]
[1]Жану проблемалары институты,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Бөгенбай батыр көшесі, 172
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Жаңа химиялық технологиялар мен материалдар ғылыми-зерттеу институты,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Әл-Фараби даңғылы, 71
[3]Астана халықаралық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Қабанбай батыр даңғылы, 8
*e-mail: dinara.muktaly@mail.ru

МЕХАНОХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ӨЗДІГІНЕН ТАРАЛАТЫН ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ СИНТЕЗ КЕЗІНДЕ БОР КАРБИДІНІҢ ТҮЗІЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Аңдатпа: *B_2O_3–Al–C және B_2O_3–Mg–C жүйелерінде механохимиялық және өздігінен таралатын жоғары температуралық синтез (ӨЖС) кезінде бор карбидінің түзілу заңдылықтары зерттелді. B_2O_3–Al–C жүйесін механохимиялық өңдеу планетарлық шарлы диірменде 350–500 айн/мин айналу жылдамдығында, 30–90 мин өңдеу ұзақтығында және шарлар массасының ұнтақ шихта массасына қатынасы (BPR) 10-30 болған жағдайда жүргізілді. Механикалық активтендіру ұнтақ қоспасының ұсақталуы және құрылымдануымен, сондай-ақ бороалюминаттық, оксидтік және карбидтік фазалардың түзілуімен жүретін қатты фазалық түрленулердің дамуымен қатар жүретіні анықталды. 450 айн/мин, 30 мин және BPR = 20 режимінде алынған өнімде рентгендік фазалық талдау арқылы $Al_{12}B_6O_{36}$, Al_2O_3, қалдық Al және алюминий-көміртекті фазамен қатар B_4C фазасы анықталды.*

©Д. Мұқталы, Б.Х. Мусабаева, А. Батқал, Қ. Қамұнұр, А. Абылайхан, 2026

ӨЖС кезінде тотықсыздандырғыш металдың табиғаты жану параметрлері мен фазатүзілуге елеулі әсер ететіні анықталды. B_2O_3–Al–C жүйесі үшін фронт температурасы 2640-2750 °C, таралу жылдамдығы 6,0-8,9 мм/с болды, ал B_2O_3–Mg–C жүйесінде температура шамамен 3000 °C-қа, фронт жылдамдығы 10,9 мм/с-қа дейін жетті. Зерттелген өнімдердегі B_4C-тың ең жоғары мөлшері алюмотермиялық жүйе үшін 4 масс. %, магнийтермиялық жүйе үшін 5 масс. % құрады. ӨЖС өнімдерінде B_4C-пен қатар құрамы тотықсыздандырғыш табиғатына тәуелді оксидтік және бораттық фазалар түзіледі. Көпкомпонентті өнімдерден бор карбидін селективті химиялық өңдеу арқылы кейіннен бөліп алу мүмкіндігі көрсетілді. Алынған нәтижелер B_4C-құрамды материалдарды бағытталған түрде қалыптастыру үшін механикалық активтендіру мен металлотермиялық ӨЖС-ті үйлестірудің перспективалылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: *бор карбиді, механохимиялық синтез, механикалық активтендіру, өздігінен таралатын жоғары температуралық синтез, алюмотермия, магниетермия, фазатүзілу.*

Кіріспе

Бор карбиді (B_4C) жоғары қаттылық, төмен тығыздық, химиялық тұрақтылық, тозуға төзімділік және нейтрондарды жұту қабілеті сияқты қасиеттердің үйлесімімен сипатталатын перспективалы оксидсіз керамикалық материалдардың бірі болып табылады. Осы қасиеттері оның конструкциялық керамикада, аэроғарыштық техникада және атом энергетикасында кеңінен қолданылуын қамтамасыз етеді [1-3].

B_4C алудың дәстүрлі әдісі негізінен борқұрамды қосылыстарды жоғары температурада карботермиялық тотықсыздандыруға негізделген. Бұл тәсілдің негізгі шектеулеріне процестің жоғары температурада жүргізілуі, энергия шығындарының көп болуы, бордың жоғалуы, сондай-ақ алынған өнімді кейіннен ұсақтау және тазарту қажеттілігі жатады. Осыған байланысты сыртқы энергия шығындарын төмендетуге және бастапқы компоненттердің реакциялық қабілетін арттыруға мүмкіндік беретін балама әдістер айтарлықтай қызығушылық тудырады [4-5].

Перспективалы тәсілдердің бірі – бор оксидін металлотермиялық тотықсыздандыруды қолдану. Мұндай жүйелерде металл тотықсыздандырғыш екі қызмет атқарады: B_2O_3-ті элементтік борға дейін тотықсыздандырады және түзілген бордың көміртекпен кейінгі әрекеттесуіне қажетті жылудың бөлінуіне ықпал етеді. Тотықсыздандырғыш ретінде алюминий мен магний қолданылуы мүмкін, алайда олардың химиялық белсенділігі мен реакциялардың жылулық әсерлеріндегі айырмашылықтар соңғы өнімдердің әртүрлі сипатта түзілуіне әкеледі [6-7].

Бастапқы шихтаның реакциялық қабілетін басқарудың қосымша мүмкіндіктерін механикалық активтендіру ашады [8-10]. Қарқынды ұнтақтау бөлшектер өлшемінің кішіреюімен, кристалдық құрылым ақауларының түзілуімен, фазаралық жанасу ауданының ұлғаюымен және жоғары белсенді реакциялық аймақтардың қалыптасуымен қатар жүреді. Нәтижесінде механикалық энергия компоненттердің диспергирленуін ғана емес, қатты фазалық химиялық түрленулердің басталуын да қамтамасыз ете алады. B_2O_3–Al–C жүйесі үшін бұл тәсіл ерекше қызығушылық тудырады, өйткені бор оксидінің тотықсыздануы және түзілген бордың көміртекпен әрекеттесуі тікелей механикалық өңдеу барысында жүруі ықтимал.

Энергия тиімді әдістердің тағы бірі – экзотермиялық реакциялардың ішкі жылулық әсерін пайдалануға негізделген ӨЖС [11-15]. Жергілікті инициирлеуден кейін реакциялық аймақ бастапқы шихта көлемі бойынша өздігінен таралады, соның арқасында материалдың бүкіл көлемін ұзақ уақыт сырттан қыздыру қажеттілігі болмайды. B_2O_3–Al–C және B_2O_3–Mg–C жүйелері үшін процесс бор ангидридін металлотермиялық тотықсыздандыру мен тотықсызданған бордың көміртекпен кейінгі әрекеттесуінің жиынтығы болып табылады. Сонымен қатар, металлотермиялық процесс барысында бірфазалы B_4C-ты тікелей алу оксидтік және бораттық қосылыстардың бәсекелес түзілуімен күрделенеді. Сондықтан энергетикалық әсер ету тәсілі, тотықсыздандырғыш табиғаты, процесс параметрлері және түзілетін өнімнің фазалық құрамы арасындағы өзара байланысты анықтау маңызды ғылыми міндет болып табылады.

Осы жұмыстың мақсаты – B_2O_3–Al–C және B_2O_3–Mg–C жүйелерінде механохимиялық және ӨЖС кезінде бор карбидінің түзілу заңдылықтарын зерттеу, сондай-ақ процесс жағдайларының жану сипаттамалары мен алынатын өнімдердің фазалық құрамына әсерін бағалау.

Материалдар мен әдістер

Бастапқы компоненттер ретінде бор оксиді B_2O_3, металл алюминий мен магний ұнтақтары және көміртек қолданылды. Механохимиялық синтез үшін үшкомпонентті B_2O_3–Al–C жүйесі пайдаланылды. Алюминий B_2O_3 тотықсыздандырғышы қызметін атқарды, ал көміртек карбид түзуші компонент болды. Бастапқы эксперименттік деректер бойынша шихта массасы 10 г құрады: 5,52 г B_2O_3, 3,38 г Al және 1,10 г техникалық көміртек.

Механохимиялық өңдеу болат ұнтақтау камерасы және болат шарлары бар планетарлық шарлы диірменде жүргізілді. Өзгермелі параметрлер ретінде планетарлық дискінің айналу жылдамдығы, өңдеу ұзақтығы және шарлар массасының ұнтақ массасына қатынасы (BPR) алынды.

ӨЖС үшін бастапқы реагенттер ретінде жоғары тазалықтағы B_2O_3 (≥99 %), дисперстілігі <100 мкм металл Al немесе Mg ұнтақтары, сондай-ақ ұсақ дисперсті графит түріндегі көміртек қолданылды. Компоненттер біртекті қоспа алынғанша 20-30 мин араластырылды, содан кейін 100 МПа қысымда диаметрі шамамен 20 мм және биіктігі 40-45 мм цилиндрлік үлгілер қалыпталды.

Реакцияны жүргізу үшін ӨЖС-ті инициирлеуге арналған ықшам қондырғы болып табылатын арнайы жасалған зертханалық мини-реактор қолданылды (1-сурет). Құрылғы металл негіз-тұғырдан, керамикалық тигельден, контактілі қысқыштардан және трансформатор түріндегі ток көзінен тұрды.



Сурет 1 – ӨЖС процесін жүргізуге арналған зертханалық қондырғының сызбасы

Престелген үлгілер тигельдің ішіне орналастырылып, одан кейін контактілерге трансформатордан электр сымы жалғанды. Реакция қоспаның жергілікті қызуы мен тұтануын туғызатын қысқа мерзімді электр импульсін беру арқылы инициирленді. Тұтанғаннан кейін реакция фронты үлгінің бүкіл көлемі бойынша таралып, қарқынды жарқырау және жылу бөлінуімен жүрді. Реакция аяқталған соң тигель табиғи түрде салқындатылып, өнім кейінгі талдау үшін алынды.

Ұсынылған қондырғы B_2O_3–Al–C және B_2O_3–Mg–C жүйелеріндегі ӨЖС процесін зертханалық жағдайда инициирлеуге және металлотермиялық тотықсыздану мен карбид түзілу процестерінің жүруін зерттеуге мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылаулар

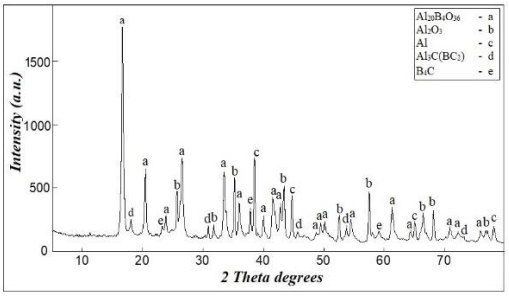
Механикалық активтендіру жағдайларының B_2O_3–Al–C жүйесіндегі өнімдердің түзілуіне әсері

Механикалық әсер қарқындылығының қатты фазалық түрленулерге ықпалын анықтау үшін механикалық өңдеудің алты режимі зерттелді. Планетарлық дискінің айналу жылдамдығы 350-ден 500 айн/мин-ге дейін, өңдеу ұзақтығы 30-дан 90 мин-ге дейін, ал шарлар массасының ұнтақ шихта массасына қатынасы (BPR) 10-нан 30-ға дейін өзгертілді. Эксперименттік жағдайлар 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1 – B_2O_3–Al–C қоспасын механикалық активтендіру режимдері

№	Планетарлық дискінің айналу жылдамдығы, айн/мин	Уақыт, мин	BPR
1	350	30	10
2	350	60	20
3	450	30	20
4	450	60	20
5	450	90	20
6	500	60	30

2-суретте № 3 тәжірибе режимінде алынған механосинтез өнімдерінің дифрактограммасы келтірілген.

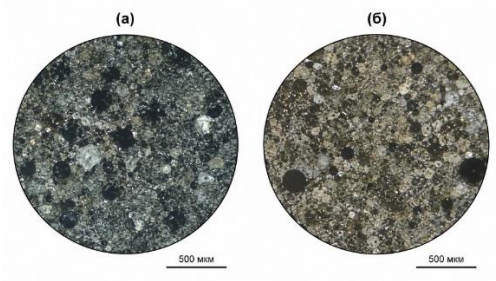


Сурет 2 – B_2O_3–Al–C жүйесіндегі механосинтез өнімдерінің дифрактограммасы

Планетарлық дискінің айналу жылдамдығы – 450 айн/мин, уақыт – 30 мин, BPR – 20.

Қарқынды шыңдардың негізгі бөлігі фазалық құрамда басым болатын және ауа оттегінің қатысуымен B_2O_3-тің алюминиймен әрекеттесуі нәтижесінде түзілетін $Al_{12}B_6O_{36}$ қосылысына («a» индексі) жатады. «b» деп белгіленген қосымша рефлекстер Al_2O_3 алюминий оксидіне тиесілі; бұл фазаның болуы ұнтақтау кезінде алюминийдің бір бөлігінің тотығуымен байланысты. «c» индексі бар сызықтар қоспада реакцияға түспеген күйде сақталған металл алюминийге сәйкес келеді. «d» деп белгіленген шыңдар механикалық әсер жағдайында көміртектің алюминиймен әрекеттесуі нәтижесінде түзілетін Al_4C_3 (немесе қабылданған белгілеуде $Al_4C(BC_2)$) қосылысына жатады. 2θ ≈ 36–38° және 2θ ≈ 45–47° аймақтарында B_4C фазасына тиесілі «e» индексімен белгіленген әлсіз шыңдар байқалады. Олардың төмен қарқындылығы осы жағдайларда бор карбидінің түзілуі шектеулі және тек ішінара жүретінін көрсетеді.

3-суретте B_2O_3–Al–C қоспасының әртүрлі өңдеу режимдерінде алынған механосинтез өнімдерінің оптикалық микрофотографиялары көрсетілген. 3а-суреттегі құрылым ішінара ұсақталған B_2O_3-ке сәйкес келетін ірі ашық түсті фрагменттердің және аз мөлшердегі қара түсті қосындылардың болуымен сипатталады.



а – 1 режим б – 2 режим

Сурет 3 – B_2O_3–Al–C қоспасын әртүрлі режимдерде механикалық активтендіру өнімдерінің оптикалық микрофотографиялары

Ірі шынытәрізді және әлсіз диспергирленген бөлшектердің басым болуы осы режимде қоспаның механикалық активтену дәрежесінің төмен екенін көрсетеді. 3б-суретте неғұрлым қарқынды механикалық өңдеу кезінде түзілетін алюминийқұрамды және оксоборидтік фазаларға сәйкес келетін ұсақ дисперсті түйіршіктер мен қара түсті тығыз агломераттар басым. Бастапқы B_2O_3-тің ірі фрагменттері іс жүзінде байқалмайды, бұл ұсақталу деңгейінің жоғары және реакциялық аймақтардың жақсы дамығанын көрсетеді. Екі үлгі арасындағы морфологиялық айырмашылықтар таңдалған режимдердің энергия жүктемесіне сәйкес келеді және негізінен механикалық ұсақтаудан механикалық активтендірілген қатты фазалық әрекеттесу өнімдерінің түзілуіне өтуді көрсетеді.

B_2O_3–Al–C қоспасын ауа атмосферасында механосинтездеу барысында өнімнің фазалық құрамында көрініс табатын бірқатар қатты фазалық түрленулер жүреді. Алғашқы процесс – бор оксидінің алюминиймен тотықсыздануы нәтижесінде Al_2O_3 және бос бордың түзілуі. Түзілген бор көміртекпен ішінара әрекеттесіп, аз мөлшерде бор карбидін түзеді, бұл рентгенограммадағы B_4C-тың әлсіз рефлекстеріне сәйкес келеді.

Сонымен қатар алюминий көміртекпен әрекеттесіп, алюминий карбидін түзеді. Ауада ұнтақтау жағдайында алюминийдің бір бөлігі оттекпен қосымша тотығып, Al_2O_3 үлесінің артуына әкеледі. Бір мезгілде B_2O_3 және Al_2O_3-тің бір бөлігі $Al_{12}B_6O_{36}$ бороалюминаттық фазасына өтеді, бұл оның механосинтез өнімдері арасында басым болуын түсіндіреді.

Синтез өнімдерінен бор карбидін бөліп алу үшін сілтілік еріту қолданылды. B_4C–Al–Al_2O_3–бороалюминаттар қоспасы 80-100 °C температурада 4–8 М NaOH ерітіндісінде ұсталды. Алюминаттық және бороалюминаттық фазалар $[Al(OH)_4]^-$ кешенді алюминаттары және борат-алюминат аниондары түрінде ерітіндіге өтті. Металл алюминий сутек бөле отырып сілтіде толық еріді. Ерімейтін қалдық тазартылған бор карбидінен тұрды. Сүзуден кейін материал сілті толық жойылғанша бірнеше рет сумен жуылып, кептірілді. Химиялық шаймалау B_4C-ты Mg-, Al-құрамды және бораттық жанама фазалардан бөліп алуды қамтамасыз етті. Осылайша, зертханалық масштабтағы механосинтез дәстүрлі жоғары температуралық процеске қарағанда шамамен 6-8 есе аз сыртқы энергия шығынын талап етеді.

Тотықсыздандырғыштың ӨЖС сипаттамаларына әсері

Алюмотермиялық және магнийтермиялық жүйелер арасында фронттың температурасы мен таралу жылдамдығы бойынша елеулі айырмашылықтар байқалды.

Жанудың тұрақтылығы, ең жоғары температура және фронт жылдамдығы стехиометрия мен тотықсыздандырғыш мөлшеріне тәуелді. Алюмотермиялық жүйеде фронт температурасы 2640-2750°C, ал жылдамдығы 6,0-8,9 мм/с болды. Магнийтермиялық жүйеде температура жоғарырақ болып, 3000 °C-қа дейін, ал жылдамдық 10,7-10,9 мм/с-қа дейін жетті. Тотықсыздандырғыш (Al немесе Mg) мөлшерін арттыру B_4C шығымының ұлғаюына және B_2O_3 толық тотықсызданбағанда түзілетін оксидті-бораттық фазалар мөлшерінің азаюына әкелді (2-кесте).

Кесте 2 – Al және Mg жүйелеріндегі ӨЖС-тің салыстырмалы сипаттамасы

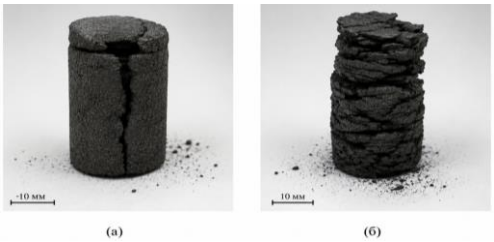
Параметр	B_2O_3–Al–C	B_2O_3–Mg–C
Фронт температурасы, °C	2640-2750	2890–≈3000
Фронт жылдамдығы, мм/с	6,0-8,9	7,5-10,9
Негізгі жанама өнімдер	Al_2O_3, бораты Al	MgO, бораты Mg
Зерттелген үлгілердегі B_4C-тың ең жоғары мөлшері, масс. %	4	5

Кестеден магнийтермиялық тотықсыздану фронттың неғұрлым жоғары температурасы мен жылдамдығын қамтамасыз ететіні көрінеді. Бұл Al_2O_3-пен салыстырғанда MgO түзілуінің экзотермиялық әсерінің жоғары болуымен байланысты. Алюмотермиялық жүйеде процесс жұмсағырақ жүреді, бірақ B_4C–Al_2O_3 композициялық материалдарын алуға ықпал ететін тығыз Al_2O_3 матрицасын қалыптастырады.

4-суретте алюмотермиялық және магнийтермиялық жүйелерде алынған бор карбидінің ӨЖС-синтез өнімдері көрсетілген.

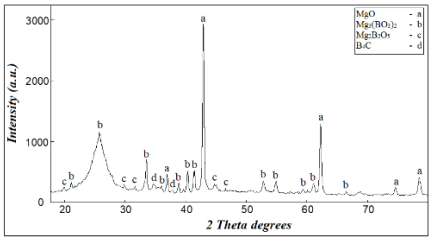
Алюмотермиялық әдіспен синтезделген үлгі айқын шөгу жарықшақтарымен және цилиндрлік пішіннің ішінара бұзылуымен сипатталады. Мұндай морфология тығыз Al_2O_3 оксидтік фазасының түзілуімен және дайындама көлеміндегі елеулі температуралық градиенттермен байланысты. Салқындау кезінде ішкі кернеулер пайда болып, фрагменттердің жарылуы мен қабаттануына әкеледі. Жалпы құрылым ұсақ қабатталған аймақтарсыз, ірі блокты күйде қалады.

Оған қарағанда магнийтермиялық синтез өнімі айқынырақ қабатты-пластинкалы құрылымға ие. Үлгінің жұқа көлденең қабаттарға сегменттелуі реакцияның жоғары экзотермиялылығымен және MgO түзілу кезіндегі қарқынды газ бөлінуімен байланысты.

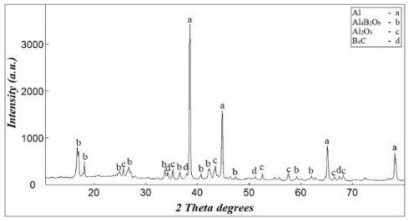


Сурет 4 – Алюмотермиялық және магнийтермиялық әдістермен алынған бор карбиді синтезінің өнімдері: а – алюмотермиядан кейінгі үлгі; б – магнийтермиядан кейінгі үлгі

Фронт температурасының жоғары болуына (3000 °С-қа дейін) және MgO тығыздығының төмендігіне байланысты материал неғұрлым кеуекті болып қалыптасады және қабат бойымен ажырауға бейім келеді. Бұл ретте цилиндрлік пішін алюмотермиялық нұсқамен салыстырғанда жақсырақ сақталады, алайда құрылымның монолиттілігі төмен. 5-суретте B_2O_3–Mg(25%)–C (А) және B_2O_3–Al(40,5%)–C (Б) жүйелеріндегі ӨЖС өнімдерінің дифрактограммалары көрсетілген.



А



Б

Сурет 5 – B_2O_3–Mg(25%)–C (А) және B_2O_3–Al(40,5%)–C (Б) жүйелеріндегі ӨЖС өнімдерінің рентгендік дифрактограммалары

5-суретте магнийтермиялық B_2O_3–Mg(25%)–C және алюмотермиялық B_2O_3–Al(40,5%)–C жүйелерінде алынған ӨЖС өнімдерінің рентгендік дифрактограммалары көрсетілген. Фазалық құрамды салыстыру тотықсыздандырғыш табиғатының жоғары температуралық синтез өнімдеріне елеулі әсерін көрсетеді. Магнийтермиялық жүйеде 2θ ≈ 37°, 43° және 62° аймақтарындағы қарқынды рефлекстермен сипатталатын MgO басым фаза болып табылады. Онымен қатар магний бораттары және 2θ ≈ 38-40° аймағында мақсатты B_4C фазасының әлсіз рефлекстері тіркеледі. MgO мен магнийқұрамды бораттардың болуы B_2O_3-тің металлотермиялық тотықсыздануының аралық оттекқұрамды қосылыстардың бір мезгілде түзілуімен қарқынды жүретінін көрсетеді.

Алюмотермиялық жүйе үшін қалдық металл Al рефлекстерінің басым болуы тән, бұл оның бастапқы шихтадағы артық мөлшерімен және реакция барысында толық жұмсалмауымен байланысты. Фазалық құрамда $Al_4B_2O_9$ бороалюминаты және Al_2O_3 да кездеседі. Магнийтермиялық өнімдегідей, B_4C түзілуі 2θ ≈ 37-40° аралығындағы төмен қарқынды рефлекстермен расталады. Осылайша, зерттелген екі жүйеде де бор карбиді негізінен оксидтік және бораттық қосылыстар түзілуі аясында минорлық фаза ретінде қалыптасады. Mg қолдану MgO және магнийқұрамды бораттардың түзілуіне ықпал етсе, Al қолдану алюминийқұрамды оксидті-бораттық фазалардың түзілуіне және тотықсыздандырғыштың бір бөлігінің реакцияға түспей сақталуына әкеледі. Алынған нәтижелер тотықсыздандырғыш металдың табиғаты мен мөлшері бор карбидінің ӨЖС кезіндегі фазатүзілу бағытын анықтайтын маңызды факторлар екенін растайды.

Жалпы алғанда, өнімдердің фазалық құрамы тотықсыздандырғыш мөлшеріне тәуелді болды (3-кесте). Al немесе Mg жеткілікті болғанда үлгілерде мақсатты B_4C фазасы анықталды, ал тотықсыздандырғыш тапшылығында алюминий немесе магний оксидтері және сәйкес бораттық қосылыстар түзілді. Магнийтермиялық жүйеде $Mg_2B_2O_5$ және $Mg_3B_2O_6$, ал алюмотермиялық жүйеде $Al_4B_2O_9$ және $Al_{20}B_4O_{36}$ фазалары анықталды. Тотықсыздандырғыш үлесі артқан сайын B_4C-тың массалық үлесі ұлғайды.

Екі жүйені салыстыру B_4C түзілуі екі реакцияда да тотықсыздандырғыштың артық мөлшерін қажет ететінін көрсетеді. Al немесе Mg мөлшері 20 %-дан төмен болғанда бор оксидінің тотықсызданууы толық жүрмей, бораттық фазалар түзіледі.

Кесте 3 – B_4C-құрамды ӨЖС өнімдерінің фазалық құрамы

Жүйе	Үлгі	Негізгі фаза, масс. %	Негізгі ілеспе фазалар, масс. %	B_4C, масс. %
B_2O_3–Al–C	Al-1	$Al_{20}B_4O_{36}$ – 60	Al_2O_3 – 26; Al – 8	2
B_2O_3–Al–C	Al-2	Al – 41	$Al_4B_2O_9$ – 38; Al_2O_3 – 17	4
B_2O_3–Mg–C	Mg-1	MgO – 65	$Mg_3B_2O_6$ – 28; $Mg_2B_2O_5$ – 5	2
B_2O_3–Mg–C	Mg-2	MgO – 83	$Mg_3B_2O_6$ – 14	3
B_2O_3–Mg–C	Mg-3	MgO – 89	$Mg_3B_2O_6$ – 6	5

Осылайша, ӨЖС нәтижесінде алынған материалдар көпкомпонентті керамикалық композиттер болып табылады. Фазалық талдау B_4C функционалдық фазалардың бірі ретінде түзілетінін, ал негізгі матрицаны жоғары температуралық оксидтер мен тотықсыздандырғыштың бораттық қосылыстары құрайтынын көрсетті. Магнийтермиялық жүйеде аз мөлшердегі B_4C қатысында MgO, $Mg_3(BO_3)_2$ және $Mg_2B_2O_5$ басым, бұл B_4C–MgO–Mg-борат типті композицияға сәйкес келеді. Алюмотермиялық жүйеде негізгі фазалар Al_2O_3, $Al_4B_2O_9$ және $Al_{20}B_4O_{36}$, ал бор карбиді минорлық фаза түрінде болады.

ӨЖС-синтезінің көпкомпонентті өнімдерінен таза B_4C карбидтік фазасын алу үшін B_4C-тың минералдық қышқылдар мен сілтілерде іс жүзінде ерімеуіне негізделген селективті химиялық тазарту қолданылды. B_2O_3–Mg–C жүйесінің реакциялық өнімдерінде MgO, $Mg_3(BO_3)_2$, $Mg_2B_2O_5$ және аз мөлшерде B_4C, ал B_2O_3–Al–C жүйесінің өнімдерінде Al_2O_3, бороалюминаттар және қалдық Al болды. Бұл ілеспе фазалардың барлығы қышқылдарда немесе сілтілерде жақсы ериді, ал B_4C қатты қалдықта қалады. Магнийтермиялық өнімдер үшін қышқылдық шаймалау қолданылды. Ұсақталған материал 70–90 °C температурада 10–20%-дық HCl ерітіндісімен өңделді. MgO және магний бораттары Mg^{2+} және бор қышқылын түзе отырып ерітіндіге өтті. B_4C ерімейтін қалдық түрінде сақталды. Сүзу және жуудан кейін Mg-құрамды фазаларды толық жою үшін қышқылмен өңдеу циклі қайталанды. Тазартылған қалдық бейтарап pH-қа дейін жуылып, 100–120 °C-та кептірілді. Алюмотермиялық өнімдер үшін таза бор карбидін бөліп алу сызбасы механохимиялық синтездегідей болды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жұмыста B_2O_3–Al–C және B_2O_3–Mg–C жүйелерінде механохимиялық және өздігінен таралатын жоғары температуралық синтез кезінде бор карбидінің түзілу ерекшеліктері зерттелді. Алынған эксперименттік нәтижелер негізінде келесі қорытындылар жасалды.

B_2O_3–Al–C жүйесін механикалық активтендіру компоненттердің қатты фазалық әрекеттесуінің дамуына ықпал етеді. Планетарлық дискінің айналу жылдамдығын 350-500 айн/мин, өңдеу ұзақтығын 30-90 мин және BPR мәнін 10–30 аралығында өзгерткенде өнімдердің дисперстілігі мен морфологиясында айқын өзгерістер байқалады. Өңдеу қарқындылығы артқан сайын ірі, әлсіз диспергирленген бөлшектердің мөлшері азайып, ұсақ дисперсті түйіршіктер мен агломераттардың үлесі артады, бұл фазаралық әрекеттесудің дамуын көрсетеді.

B_4C түзілуі механохимиялық өңдеу барысында-ақ жүреді. 450 айн/мин, 30 мин және BPR = 20 режимінде дифрактограммада $2\theta \approx 36–38°$ және 45-47° аймақтарында B_4C-тың әлсіз рефлекстері тіркелді. Бір мезгілде $Al_{12}B_6O_{36}$, Al_2O_3 және алюминий-көміртекті фаза түзіледі, ал металл Al-дың бір бөлігі реакцияға түспеген күйде сақталады. Бұл ауада механикалық активтендіру кезінде тотықсыздану, тотығу, борат және карбид түзілу процестерінің бәсекелес сипатта жүретінін көрсетеді.

Тотықсыздандырғыш металдың табиғаты ӨЖС параметрлеріне елеулі әсер етеді. Магнийтермиялық процесс алюмотермиялық процеске қарағанда жоғары температурамен және реакциялық фронттың жоғары таралу жылдамдығымен сипатталады. B_2O_3–Mg–C жүйесінде температура шамамен 3000 °C-қа, жылдамдық 10,9 мм/с-қа дейін жетеді, ал B_2O_3–Al–C үшін сәйкес көрсеткіштер 2640-2750 °C және 6,0-8,9 мм/с құрайды.

Рентгендік фазалық талдау екі металлотермиялық жүйеде де B_4C түзілетінін растады, алайда мақсатты карбид басым фаза болып табылмайды. Магнийтермиялық өнімдерде MgO және магнийқұрамды бораттық қосылыстар басым, ал алюмотермиялық жүйеге Al_2O_3 және бороалюминаттық фазалардың түзілуі әрі реакцияға түспеген Al-дың бір бөлігінің сақталуы тән. B_4C-тың ең жоғары массалық үлесі Mg-жүйесінде 5 %, Al-жүйесінде 4 % болды.

Өнімдердің морфологиясы да тотықсыздандырғыш табиғатымен анықталады. Алюмотермиялық өнім айқын жарықшақтылықпен және салыстырмалы ірі блокты құрылыммен сипатталса, магнийтермиялық үлгі неғұрлым дамыған қабатты-пластинкалы және кеуекті құрылымға ие.

B_4C-тың фазалық тазалығын арттыру үшін синтезден кейінгі химиялық өңдеу қажет. Ілеспе Mg-құрамды фазалар қышқылдық шаймалау арқылы жойылады, ал Al-құрамды өнімдер үшін бор карбидін реакциялық массаның еритін компоненттерінен бөлуге мүмкіндік беретін сілтілік өңдеу қарастырылған.

Әдебиеттер тізімі

1. Effects of boron oxide composition, structure, and morphology on B_4C formation via the SHS process in the B_2O_3–Mg–C ternary system / S. Aghili et al // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46. – P. 7223-7234. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.217.
2. Novel Pathway for the Combustion Synthesis and Consolidation of Boron Carbide / M.K. Zakaryan et al // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 5042. https://doi.org/10.3390/ma15145042.
3. Influence of Sintering Process Conditions on Microstructural and Mechanical Properties of Boron Carbide Ceramics Synthesized by Spark Plasma Sintering / Y. Liu et al // Materials. – 2021. – № 14. – P. 1100. https://doi.org/10.3390/ma14051100.
4. Avcioglu S. Effect of elemental nano boron on the transformation and morphology of boron carbide (B4C) powders synthesized from polymeric precursors / S. Avcioglu, F. Kaya, C. Kaya // Ceram. Int. – 2020. – № 46. – P. 17938-17950. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.104.
5. Construction of a Novel Barium-Free Green-Light Emitting Illuminant Based on Boron Carbide / Z. Huang et al // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2021. – Т. 46, № 9. – P. 1480-1488. https://doi.org/10.1002/prep.202100038.
6. Walters I.T. Environmentally friendly boron-based pyrotechnic delays: an additive manufacturing approach / I.T. Walters, L.J. Groven // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2019. – Т. 7, № 4. – P. 4360-4367. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06204.
7. Horiuchi K. Reactivity of boron carbide and metal oxide mixtures / K. Horiuchi, A. Huynh, J. Kalman // Proceedings of the Combustion Institute. – 2023. – Т. 39, № 3. – P. 3313-3321. https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.07.107.
8. Yaghoubi M. Effect of the magnesium content on the mechanochemical behavior in ternary system Mg–B2O3–C / M. Yaghoubi, O. Torabi // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2014. – P. 132-140. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.11.014.
9. Combustion and Radiation Properties of B4C/PTFE Based Pyrolants Under the Influence of Various Oxidants / B. Zhou et al //Combustion Science and Technology. – 2025. – P. 1-23. https://doi.org/10.1080/00102202.2025.2536218.
10. Boron Carbide Composites Produced by Self-Propagating High-Temperature Synthesis / R.G. Abdulkarimova et al // Revista Ingeniería UC. – 2021. – Vol. 28, № 1. https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i1.5.
11. Influences of mechanical activation and tartaric acid addition on the efficiency of B_4C synthesis / S.F. Feiz et al // Synthesis and Sintering. – 2023. – Vol. 3. – P. 54-59. https://doi.org/10.53063/synsint.2023.31140.
12. Influence of Kinetic Factors on Preparation of Boron Carbide by Magnesiothermic Self-Propagation Synthesis / H. Shi et al // J. Cent. South Univ. – 2023. – № 30. – P. 735-748. https://journal.hep.com.cn/jocsu/EN/10.1007/s11771-023-5264-1.
13. Wang Self-propagating high-temperature synthesis of B4C: integrating combustion wave features and crystallization kinetics / Wang, D. Zhihe, Zh. Tingan // Ceramics International. – 2025. – Issue 30. – P. 65856-65870. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.11.265.
14. The synthesis and characterization of B6O, B4C and ZrB2 at a pressure of 6 GPa / D. Chu et al // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2025. – P. 107070. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2025.107070.
15. Wang C. Effect of carbon sources on morphology of B4C powders synthesized by magnesiothermic SHS / C. Wang, Zh. Dou, T. Zhang // Powder Technology. – 2026. – P. 122524. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2026.122524.

Қаржыландыру

Жұмыс BR28712843 «Технологиялық жағуда, пиротехникалық құрамдарда және аэрозольдық композицияларды бүркемелеуде қолдану үшін екіншілік алюминий қорытпалары мен металл-органикалық материалдар негізінде көп компонентті жүйелердің технологияларын әзірлеу және сынау» жоба аясында орындалды.

Д. Мұқталы[1,2*], Б.Х. Мусабаева[3], А. Батқал[1], Қ. Қамұнұр[1], А. Абылайхан[2]
[1]Институт проблем горения, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172
[2]Научно-исследовательский институт новых химических технологий и материалов
КазНУ имени аль-Фараби, 050040, Республика Казахстан, Алматы, пр. Аль-Фараби, 71
[3]Международный университет Астана,
Республика Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай батыра, 8
*e-mail:dinara.muktaly@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАРБИДА БОРА ПРИ МЕХАНОХИМИЧЕСКОМ И САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕМСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ СИНТЕЗЕ

Исследованы закономерности формирования карбида бора в системах B_2O_3–Al–C и B_2O_3–Mg–C при механохимическом и самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС). Механохимическую обработку системы B_2O_3–Al–C проводили в планетарной шаровой мельнице при скорости вращения 350–500 об/мин, продолжительности 30–90 мин и отношении массы шаров к массе порошковой шихты (BPR) 10–30. Установлено, что механическая активация сопровождается измельчением и структурированием порошковой смеси, а также развитием твердофазных превращений с образованием бороалюминатных, оксидных и карбидных фаз. В продукте, полученном при 450 об/мин, продолжительности обработки 30 мин и BPR = 20, методом рентгенофазового анализа обнаружена фаза B_4C, присутствующая наряду с $Al_{12}B_6O_{36}$, Al_2O_3, остаточным Al и алюминий-углеродсодержащей фазой.

При СВС установлено существенное влияние природы металла-восстановителя на параметры горения и фазообразование. Для системы B_2O_3–Al–C температура фронта составляла 2640-2750°C при скорости распространения 6,0–8,9 мм/с, тогда как для B_2O_3–Mg–C температура достигала около 3000°C, а скорость фронта – 10,9 мм/с. Максимальное содержание B_4C в исследованных продуктах составляло 4 мас. % для алюмотермической и 5 мас. % для магнийтермической системы. В продуктах СВС наряду с B_4C формируются оксидные и боратные фазы, состав которых определяется природой восстановителя. Показана возможность последующего выделения карбида бора из многокомпонентных продуктов путем селективной химической обработки. Полученные результаты показывают перспективность сочетания механической активации и металлотермического СВС для направленного формирования B_4C-содержащих материалов.

Ключевые слова: *карбид бора, механохимический синтез, механическая активация, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, алюмотермия, магниетермия, фазообразование.*

D. Muktaly[1,2*], B.X. Musabayeva[3], A. Batkal[1], K. Kamunur[1], A.Abylaikhan[1,2]
[1]Institute of Combustion Problems,
Republic of Kazakhstan, Almaty, Bogenbai Batyr St., 172
[2]Scientific Research Institute for New Chemical Technologies and Materials at Al-Farabi Kazakh National University, 050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi, 71
[3]Astana International University, Republic of Kazakhstan, Astana, Kabanbai Batyr, 8
*e-mail: dinara.muktaly@mail.ru

FEATURES OF BORON CARBIDE FORMATION DURING MECHANOCHEMICAL AND SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

The formation behavior of boron carbide in the B_2O_3–Al–C and B_2O_3–Mg–C systems during mechanochemical and self-propagating high-temperature synthesis (SHS) was investigated. Mechanochemical treatment of the B_2O_3–Al–C system was carried out in a planetary ball mill at rotational speeds of 350-500 rpm, treatment times of 30-90 min, and ball-to-powder mass ratios (BPR) of 10-30. Mechanical activation was found to promote particle size reduction and structural modification of the powder mixture, as well as solid-state transformations accompanied by the formation of boroaluminate, oxide, and carbide phases. X-ray diffraction analysis of the product obtained at 450 rpm, a treatment time of 30 min, and BPR = 20 revealed the presence of the B_4C phase along with $Al_{12}B_6O_{36}$, Al_2O_3, residual Al, and an Al–C-containing phase.

During SHS, the nature of the metallic reducing agent was found to have a significant effect on the combustion parameters and phase formation. For the B_2O_3–Al–C system, the combustion-front temperature ranged from 2640 to 2750 °C, with a propagation velocity of 6.0-8.9 mm/s, whereas in the B_2O_3–Mg–C system, the temperature reached approximately 3000 °C and the front velocity reached 10.9 mm/s. The maximum B_4C

content in the investigated products was 4 wt.% for the aluminothermic system and 5 wt.% for the magnesiothermic system. In addition to B_4C, oxide and borate phases were formed in the SHS products, with their composition being determined by the nature of the reducing agent. The possibility of subsequently isolating boron carbide from the multicomponent products by selective chemical treatment was demonstrated. The obtained results indicate that combining mechanical activation with metallothermic SHS is a promising approach for the controlled formation of B_4C-containing materials.

Key words: *boron carbide, mechanochemical synthesis, mechanical activation, self-propagating high-temperature synthesis, aluminothermy, magnesiothermy, phase formation.*

Авторлар туралы мәліметтер

Динара Мұқталы✉ – PhD, қауымдастырылған профессор. Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Жаңа химиялық технологиялар мен материалдар ғылыми-зерттеу институтының жетекші ғылыми қызметкері; e-mail: dinara.muktaly@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1139-5488.

Бинур Хабасовна Мусабаева – х.ғ.к., профессор, Астана Халықаралық университеті; e-mail: mussabayevabinur@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2209-1209.

Айсулу Батқал – Жану проблемалары институтының ғылыми қызметкері; e-mail: abatkalova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2271-6953.

Қастер Қамұнұр – PhD, қауымдастырылған профессор. Жану проблемалары институтының жетекші ғылыми қызметкері; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Ақерке Абылайхан – х.ғ.к., Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Жаңа химиялық технологиялар мен материалдар ғылыми-зерттеу институты жетекші ғылыми қызметкері; e-mail: akerkeabylaikhan2@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1489-9603.

Сведения об авторах

Динара Мұқталы✉ – PhD, ассоциированный профессор. Ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института новых химических технологий и материалов КазНУ им. аль-Фараби; e-mail: dinara.muktaly@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1139-5488.

Бинур Хабасовна Мусабаева – к.х.н., профессор, Международный университет Астана; e-mail: mussabayevabinur@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2209-1209.

Айсулу Баткал – научный сотрудник Института проблем горения; e-mail: abatkalova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2271-6953.

Кастер Камунур – PhD, ассоциированный профессор. Ведущий научный сотрудник Института проблем горения; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Акерке Абылайхан – к.х.н., ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института новых химических технологий и материалов КазНУ им. аль-Фараби; e-mail: akerkeabylaikhan2@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1489-9603.

Information about the authors

Dinara Muktaly✉ – PhD, Associate Professor. Leading Researcher at Scientific Research Institute for New Chemical Technologies and Materials, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: dinara.muktaly@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1139-5488.

Binur Mussabayeva – PhD, Professor, Astana International University; e-mail: mussabayevabinur@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2209-1209.

Aisulu Batkal – Research Associate at Institute of Combustion Problems; e-mail: abatkalova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2271-6953

Kaster Kamunur – PhD, Associate Professor. Leading Researcher at Institute of Combustion Problems; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Akerke Abylaykhan – PhD, Leading Researcher at Scientific Research Institute for New Chemical Technologies and Materials, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: akerkeabylaikhan2@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1489-9603.

Редакцияға енуі 02.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 27.06.2026
Жариялауға қабылданды 28.06.2026