

Қатты фазалық синтез әдісімен синтезделген YBCO композитінің асқынөткізгіш қасиеттеріне азот тотығының әсері

С. Төлендіұлы^{1*}, С.М. Фоменко¹, Н.Т. Рахым^{1,2}, Ш.Д. Әсілхан¹,
Б.А. Карибаев^{1,2}, Ә.Б. Совет¹, М.Т. Бекджанова¹, Қ. Болатжан^{1,2}

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы, Қазақстан

³Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даң., 71, Алматы, Қазақстан

ARTICLE INFO

Алынған
14.01.2026

Түзетілген түрде алынды
20.03.2026

Қабылданды
31.03.2026

Түйін сөздер:

YBCO; N₂O атмосферасы;
қатты фазалық синтез;
асқынөткізгіш

АҢДАТПА

Бұл жұмыста YBCO жоғары температуралы асқынөткізгішін қатты фазалық синтез әдісімен синтездеу кезінде синтез атмосферасы ретінде азот тотығы (N₂O) газының әсері зерттелді. N₂O газының жоғары температурада ыдырауы нәтижесінде оттегі бөлінуі оны баламалы оттегі көзі ретінде қолдануға мүмкіндік береді. Осы мақсатта материал 8, 10 және 12 сағат бойы N₂O атмосферасында термиялық өңдеуден өтіп, кейін O₂ газында қосымша оттегімен өңделді. Алынған үлгілердің құрылымы мен фазалық құрамы рентгенқұрылымдық талдау (XRD), ал микроморфологиясы сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM) әдістерімен зерттелді. Асқынөткізгіштік қасиеттері Physical Property Measurement System (PPMS) кешені арқылы магниттік өлшеулермен бағаланды. Нәтижесінде, 10 сағат бойы өңделген үлгілерде Y-123 фазасының басым түзілуі, құрылымның тығыздалуы, асқынөткізгіштік ауысу температурасының 91,8 К-ге дейін жоғарылауы және диамагниттік қасиеттің артуы байқалды. Бұл тәжірибелік деректер N₂O газын жоғары температуралы асқынөткізгіштерді синтездеу үшін тиімді баламалы оттегі көзі ретінде қолдануға болатынын көрсетті.

1. Кіріспе

Жоғары температуралы асқынөткізгіш YBCO құрылымның толық оттектенуін қамтамасыз ету үшін дәстүрлі түрде оттегі бар атмосферада синтезделеді. Мысалы, иттрий орнына Yb қолданылған YBCO (Y-123 аналогы) үлгілерін O₂ ағынындағы қатты фазалық реакциялық күйдіру арқылы алған [1]. ~927-937 °C температурада бірнеше сағат бойы оңтайлы күйдіріп өңдеу нәтижесінде жоғары фазалық тазалыққа қол жеткізілді: негізгі Y-123 фазасы >80 масс.% құрады (қалғаны – Y-211 және BaCuO₂ қалдықтары) [1]. Алынған үлгілер жақсы бағдарланған микроқұрылымға ие болды (с-білігі бойымен текстура) және T_c ≈ 90 K шамасында тән асқынөткізгіштік ауысуды көрсетті [1]. Сындарлы ток тығыздығы J_c 4,2 K кезінде ~1,3·10⁵ A/cm² және 77 K кезінде ~5·10³ A/cm² (сыртқы өріссіз) мәндеріне жетті [1], бұл астық шекараларының жоғары байланыстылығын және Y-123 асқынөткізгіш фазасының басым екенін көрсетеді.

Zhang және т.б. жүргізген зерттеуде (YBCO асқынөткізгіш материалдарын ультражеңіл, кеуекті және геометриясы бағдарламаланатын құрылымдар түрінде тиімді дайындау тәсілі ұсынылды [2]. Авторлар Y₂O₃-BaCO₃-CuO прекурсорлары негізінде дайындалған сиялы пастаны тікелей экструзиялық 3D-баспа (direct ink writing) әдісімен әртүрлі архитектуралық пішіндерге қалыптастырып, кейін реакциялық күйдіру арқылы YBCO фазасының түзілуін қамтамасыз еткен. Мұндай тәсіл дәстүрлі престоу әдістерімен алу қиын болатын күрделі геометриялы және өте төмен тығыздықты асқынөткізгіш құрылымдарды жасауға мүмкіндік береді [2].

Алынған баспа-таңбалы YBCO құрылымдары оттегі атмосферасында жоғары температурада термиялық өңдеуден өткізіліп, кристалл торындағы Cu-O тізбектерінің оттегімен қанығуы қамтамасыз етілді. Рентгенқұрылымдық және микроструктуралық талдаулар нәтижесінде үлгілердің орторомбтық Yba₂Cu₃O_{7-x} фазасына тән жоғары кристалдылыққа ие екені анықталды [2]. Отте-

*Corresponding author: S. Tolendiuly; E-mail address: sanat_tolendiuly@mail.ru

гімен соңғы күйдіруден кейін материалдар үшін асқынөткізгіштік ауысу температурасы $T_c \approx 90-91$ К мәндеріне жетіп, 77 К температурасында өлшенген сындарлы ток тығыздығы J_c шамамен 10^3-10^4 А/см² деңгейінде болды. Бұл нәтижелер ультражеңіл және кеуекті YBCO құрылымдары да дұрыс оттектендіру жағдайында тұрақты асқынөткізгіш қасиеттер көрсете алатынын дәлелдейді [2].

Сонымен қатар, YBCO асқынөткізгішінің түзілу үдерісіне прекурсорлардың механоактивация параметрлерінің ықпалы да маңызды факторлардың бірі болып табылады [3]. Механохимиялық алдын ала өңдеу Ba–Cu–O жүйесіндегі диффузиялық процестерді жеделдетіп, қатты фазалық реакцияның басталу температурасын төмендететіні анықталған. 300 об/мин жылдамдықта 30 мин активтеу прекурсорлар арасындағы жанасу бетін ұлғайтып, олардың реакциялық қабілетін күшейтеді, бұл өз кезегінде 900-930 °C аралығында Y-123 фазасының қарқынды түзілуіне жағдай жасайды. Мұндай тәсіл фазалық трансформациялардың толық жүруіне және негізгі фазаның үлесін арттыруға мүмкіндік беретіні көрсетілген [3].

Механоактивацияның әсері тек фазалық құраммен шектелмей, микроструктуралық эволюцияға да тікелей ықпал ететіні байқалады. Активтеу деңгейінің артуы прекурсорлардың гомогенділігін жақсартып, негізгі Y-123 фазасының мөлшерін көбейтеді және CuO, Y₂BaCuO₅ (Y-211), BaCuO₂ секілді қосалқы фазалардың үлесін төмендетеді [3]. Мұндай нәтижелер YBCO жүйесінде фазалық тазалық пен құрылымдық біртектіліктің бастапқы қоспаның дисперстілігіне және алдын ала өңделу дәрежесіне тәуелді екенін көрсетеді. Сонымен бірге, механоактивация кейінгі термиялық өңдеу барысында тығыз және тұрақты керамикалық материал қалыптастыруға ықпал ететін тиімді технологиялық қадам ретінде қарастырылады [3].

Antal және т.б. жүргізген зерттеуде YBCO (Y-123) ұнтағы мен «Top-seeded melt growth» (TSMG) әдісімен алынған көлемдік YBCO асқынөткізгіштердің әртүрлі оттегінің парциалды қысымы бар атмосфералардағы термиялық тұрақтылығы зерттелді [4]. Дифференциалды термиялық және термогравиметриялық талдаулар нәтижелері Y-123 жүйесінің балқу және ыдырау процестері өңдеу атмосферасына айтарлықтай тәуелді екенін көрсетті. Ауада жүргізілген өлшеулермен салыстырғанда аргон және төмен оттекті ортада (Ar + 0.1 vol.% O₂) перитетикалық балқу температурасының төмендейтіні және жоғары температураларда Y-123 фазасының Y₂BaCuO₅ және балқы-

маға ыдырау үрдістері күшейетіні анықталды. Бұл нәтижелер YBCO материалдарын синтездеу және кейінгі термиялық өңдеу кезінде атмосфера құрамын қатаң бақылаудың фазалық тұрақтылықты қамтамасыз етудегі маңызды рөлін көрсетеді [4].

Инертті не оттегі шектелген атмосфера (Ar, Ar–O₂) Y-123 жентектеу кезінде материалдың фазалық құрамы, микроқұрылымы және оттектік құрамы үшін маңызды фактор болып табылады. Vasoglu алғаш рет Y-123-ті қатты фазалық әдіспен әртүрлі O₂/Ar қоспаларында синтездеуді зерттеді [5]. Таза O₂-де, ауада, тіпті инертті газда күйдірілген барлық үлгілер асқынөткізгіштік қасиетке ие болғанымен, олардың сындарлы параметрлері айырмашылық көрсетті [5]. Ең үздік сипаттамалар 50% O₂ + 50% Ar атмосферасында күйдірілген үлгіде байқалды: бұл үлгінің J_c мәні таза O₂ (S100) немесе таза Ar (S0) орталарында синтезделген үлгілерге қарағанда айтарлықтай жоғары болды [5]. Синтез атмосферасының құрамын өзгерту YBCO-тектес асқынөткізгіштердің тығыздығы мен асқынөткізгіштік сипаттамаларына елеулі әсер ететіні көрсетілген.

Vaşoğlu және т.б. жүргізген зерттеуде YBCO жүйесіне жататын Y₃Ba₅Cu₈O₁₈ (Y358) керамикалары әртүрлі атмосфераларда – 100% O₂, 50% O₂/50% Ar және 100% Ar – қатты фазалық әдіспен күйдірілді [6]. Рентгенқұрылымдық талдау барлық жағдайда асқынөткізгіш фазаның қалыптасқанын көрсеткенімен, магниттік өлшеулер сындарлы ток тығыздығы J_c мәндерінің атмосфераға тәуелді екенін анықтады.

Магниттелу гистерезисі негізінде есептелген J_c мәндері бойынша ең жоғары көрсеткіш 50% O₂/50% Ar атмосферасында күйдірілген үлгіде байқалды. Авторлар бұл нәтижені оттегінің жеткілікті мөлшері мен аргонның әсерінен күшейген тығыздалу процестерінің оңтайлы үйлесімімен түсіндіреді. Ал таза Ar атмосферасында жентектеу деңгейі жоғары болғанымен, оттегінің жетіспеуі асқынөткізгіш қасиеттердің төмендеуіне әкелсе, таза O₂ ортасында оттегімен қанығу жоғары болғанымен, түйіршікаралық байланыстардың салыстырмалы әлсіреуі байқалды. Осылайша, аралас O₂/Ar атмосферасы YBCO негізіндегі материалдар үшін құрылымдық тығыздық пен оттектену дәрежесінің оңтайлы тепе-теңдігін қамтамасыз етіп, сындарлы ток тығыздығын арттыруға мүмкіндік береді [6].

Инертті газ атмосферасының YBCO (Y-123) қосылысының оттектік күйіне әсері термиялық өңдеу барысында айқын байқалатыны көрсетілген. Nagbor және т.б. термогравиметриялық және

электрлік өлшеулер арқылы Ag атмосферасында күйдіру Y-123 құрылымынан оттегінің бөлінуін күшейтіп, оттегі жетіспеушілігінің артуына алып келетінін анықтады [7]. Нәтижесінде үлгінің оттегі индексі төмендеп, стехиометриясы шамамен $YBa_2Cu_3O_{6.77}$ деңгейіне дейін өзгереді, ал ауада күйдірілген үлгілерде бұл мән $YBa_2Cu_3O_{6.88}$ шамасында сақталады [7]. Авторлар көрсеткендей, екі жағдайда да материал орторомбтық құрылым шегінде қалады, алайда Ag атмосферасында өңделген үлгілерде оттегі вакансияларының көбеюі салдарынан асқынөткізгіштік ауысу температурасы T_c аздап төмендеп, ауысу ені ΔT_c ұлғаяды [7]. Соған қарамастан, Ag-де күйдірілген үлгілер асқынөткізгіш қасиетін толық жоғалтпай, $T_c \approx 91-92$ К мәндерінде сақтайды. Бұл Y-123 құрылымының негізгі қаңқасы сақталатынын, бірақ Cu–O тізбектеріндегі оттегі позицияларының толық толмауы электрондық және тасымалдау қасиеттеріне әсер ететінін көрсетеді. Сонымен қатар, инертті атмосферада өңдеу микроқұрылымда оттегі вакансиялары мен құрылымдық ақаулардың артуына әкеліп, бұл құйындарды бекіту процестеріне және материалдың функционалдық сипаттамаларына ықпал етуі мүмкін [7].

YBCO асқынөткізгішін қатты фазалық әдіспен синтездеу кезінде оттегінің парциалды қысымы фазалық құрамның қалыптасуында шешуші рөл атқарады. Balachandran және т.б. көрсеткендей, төмендетілген O_2 қысымында ($\approx 2.7 \times 10^2$ Па) жүргізілген реакция кезінде $BaCO_3$ ыдырауынан бөлінетін CO_2 тиімді түрде шығарылып, Y_2BaCuO_5 және $BaCuO_2$ сияқты қосалқы фазалардың түзілуі айтарлықтай тежеледі [8]. Мұндай жағдайда Y_2O_3 – $BaCO_3$ – CuO прекурсорларының өзара әрекеттесу кинетикасы жеделдеп, салыстырмалы түрде төмен температурада (≈ 800 °C) таза орторомбтық Y-123 фазасын алуға мүмкіндік туады. Керісінше, атмосфералық қысымдағы O_2 ортасында күйдіру барысында жоғары температураларда CuO– $BaCuO_2$ эвтектикасының балқуы және көпфазалы құрылымның түзілуі байқалады, бұл материалдың асқынөткізгіштік қасиеттерін шектеуі мүмкін. Осылайша, O_2 парциалды қысымын төмендету қатты фазалық реакцияның бағытын бақылауға, синтез температурасын азайтуға және Y-123 фазасының тазалығын арттыруға мүмкіндік береді [8].

Жалпы, жоғары J_c -ке ие монофазалы материал алу үшін газдың тотықтырғыш қабілеті орташа, ал қатты фазаның дән өсуіне жеткілікті қозғалғыштығы қамтамасыз етілетін жағдайлар оңтайлы болып табылады.

Оксид азоты N_2O (азоттың шала тотығы) оттегі (O_2) және азот диоксидімен (NO_2) салыстырғанда салыстырмалы түрде жұмсақ тотықтырғыш болып табылады, сондықтан оның YBCO (Y-123) асқынөткізгішін синтездеуде қолданылуы соңғы жылдары ғана жүйелі түрде зерттеле бастады. Соңғы жұмыстардың бірінде YBCO жұқа қабықшалары импульсті лазерлік тұндыру (PLD) әдісімен әртүрлі газ орталарында, атап айтқанда таза O_2 , N_2O және N_2 атмосфераларында өсірілген [9].

Зерттеу нәтижелері N_2O атмосферасында тікелей тұндырылған қабықшалардың Y-123 фазасына тән жақсы кристаллографиялық бағдарға, негізінен с-білігі бойынша текстураға ие болатынын көрсетті. Алайда бастапқы күйінде мұндай қабықшаларда оттегі жетіспеушілігі байқалып, асқынөткізгіштік қасиет толық қалыптаспайды [9]. Бұл құбылыс N_2O ортасында жоғары температуралы өсу кезінде $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ матрицасының кристалдануы жүзеге асқанымен, Cu–O тізбектеріндегі оттегі позицияларының бір бөлігінің толық толтырылмай қалуымен түсіндіріледі.

Авторлар мұндай қабықшаларды кейіннен шамамен 350 °C температурада төмен қысымды O_2 ағынында қосымша күйдіру кристалдық құрылымды бұзбай-ақ оттегімен тиімді қанықтыруға мүмкіндік беретінін көрсетті [9]. Осы қосымша оттектендіруден кейін N_2O және N_2 орталарында өсірілген қабықшалардың асқынөткізгіштік сипаттамалары таза O_2 -де тікелей тұндырылған үлгілермен іс жүзінде бірдей деңгейге жетті. Атап айтқанда, оттегімен қалпына келтірілген қабықшалар үшін асқынөткізгіштік ауысу температурасы $T_c \approx 90$ К мәніне жетіп, сындарлы ток тығыздығы J_c оңтайлы легирленген Y-123 материалдарына тән деңгейде қалыптасты [9].

N_2O атмосферасы O_2 жоғары белсенділігі қажетсіз болатын жағдайларда оттегінің «жұмсағырақ» баламасы ретінде қарастырылады. Мысалы, гетероқұрылымдарды өсіру барысында N_2O газының тотықтырғыш әсері O_2 әсеріне ұқсас, бірақ кейбір астар материалдарына қатысты азырақ агрессивті екені анықталды. YBCO/NCCO p–n-гетерожұбын жасауда жоғарғы YBCO қабатын N_2O атмосферасында тұндыру оның жоғары сапалы өсуін қамтамасыз ететінін, алайда бұл процесс оттегі атмосферасындағыдай астындағы $Nd_{2-x}Ce_xCuO_4$ (NCCO) қабатын да біршама тотықтырып, оның параметрлерін нашарлататынын байқады [10]. Ал YBCO-ны таза азотта тұндырғанда астарға әсер етпегенімен, кейін YBCO қабатын міндетті түрде қосымша оттектендіру қажет болды [9]. Демек, N_2O газын Y-123 синтезі үшін тиімді тотықтырғыш ретінде қара-

стыруға болады: біріншіден, ол жоғары температуралы өсіру кезеңдерін шартты түрде «оттегісіз» ортада жүргізуге мүмкіндік береді (мысалы, оттегіге сезімтал астарлар қолданылатын құрылғылар үшін маңызды), екіншіден – қосымша күйдіріп оттектендіруден кейін толық оттектенген асқынөткізгішті алуға болады [9].

Қатты фазалық синтез әдіспен көлемдік YBCO синтезінде N_2O қолдану әзірге аз зерттелген, бірақ ұқсас әсерлер болжанып отыр: N_2O қыздыру кезінде (>600 °C) белсенді оттегіні бөле ыдырап, Ba–Cu–O балқымасын тотығуға ұшыратуы және Y-123 түзілуіне ықпал етуі мүмкін. Сонымен бірге, N_2O -ның (O_2 -ге салыстырғанда) тотықтырғыш қабілетінің төмендігі прекурсорлардың шамадан тыс ыдырап кетуін және қосалқы фазалардың түзілуін тежеуі мүмкін. Қорыта айтқанда, N_2O атмосферасы Y-123 синтезін басқарудың оттегі және инертті режимдердің артықшылықтарын біріктіретін жаңа параметрі ретінде ерекше қызығушылық тудырады.

Зерттеудің жаңалығы. Осы жұмыста N_2O атмосферасының көлемдік YBCO материалдарын қатты фазалық синтез әдіспен синтездеу барысында фазалық құрамға, микроқұрылымға және асқынөткізгіштік қасиеттерге әсері кешенді түрде зерттелді. Бұған дейінгі зерттеулер негізінен жұқа қабықшалар мен гетероқұрылымдарға бағытталған, ал көлемдік материалдар үшін мұндай жүйелі талдау жеткілікті деңгейде қарастырылмаған. Практикалық маңыздылығы. N_2O қолдану жоғары сапалы YBCO синтезі үшін жаңа мүмкіндіктер ашады: мысалы, ол асқынөткізгіштің жоғары фазалық тазалығы мен біртекті микроқұрылымын алуға мүмкіндік беретін жұмсақ тотықтырғыш жағдайларын қамтамасыз ете алады. Сонымен қатар N_2O арқылы синтез атмосферасын басқару технологиялық үдерісті оңтайландыруға (күйдіру температурасын немесе уақытын қысқартуға) және таза оттегіні пайдалану қиын немесе қажетсіз болатын жағдайларға бейімде-

уге жол ашады. Осылайша, N_2O -ның Y-123 фазасына әсерін зерттеу асқынөткізгіш оксидтердің түзілу кинетикасы мен термодинамикасы туралы іргелі білімді кеңейтеді және олардың қасиеттерін практикалық пайдалану үшін жақсарту жолдарын көрсетеді.

2. Материалдар мен әдістер

2.1. Бастапқы заттар

YBCO негізіндегі асқынөткізгіш композицияларды алу үшін келесі жоғары тазалықтағы оксид компоненттері пайдаланылды:

- Y_2O_3 (99%, 50-60 мкм),
- BaO (99%, 30-40 мкм),
- CuO (нанодисперсті, 99%, 30-50 нм).

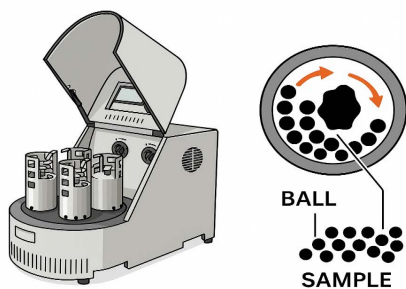
Компоненттердің массалық қатынасы Y:Ba:Cu = 17:46:29 стехиометриясына сәйкес алынды, қалған үлес күйдіру процесінде құрылымға қосылатын оттегіге тиесілі болды.

2.2. Қоспаны дайындау және механохимиялық активтеу

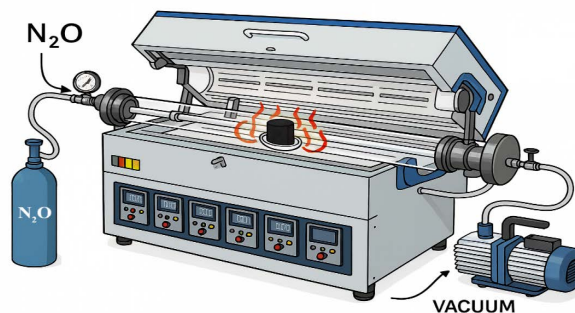
Компоненттер алдын ала қолмен араластырылып, кейін 300 мин^{-1} айналу жылдамдығымен планетарлық диірменде 30 минут бойы механохимиялық активтеуден өткізілді (сурет-1). Ұнтақталатын қоспа массасының диірмендегі фарфор шарларының массасына қатынасы 1:2 болды. Алынған біртекті қоспа 200 МПа қысыммен таблетка түрінде престелді. Бұл дайындамалардың біркелкі тығыздығын қамтамасыз етіп, кейінгі синтез сатысы үшін оңтайлы жағдай жасады.

2.3. N_2O ағынында негізгі күйдіру

Престелген таблетка тәрізді үлгілер 920 °C температурада 8, 10 және 12 сағат бойы горизонтальды түтікше пеште термиялық өңделді (сурет-2).



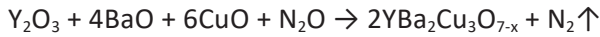
Сурет 1. Үлгіні механикалық активтеу кезінде планетарлық шар диірменнің жұмыс істеу принципі.



Сурет 2. Вакуумды түтікше пешке азоттың шала тотығы (N_2O) берілген кездегі жұмыс сызбасы.

Газ атмосферасы ретінде 278 мл/мин жылдамдықпен берілетін таза N_2O ағыны пайдаланылды. N_2O 600 °С-тан жоғары температурада белсенді оттегін бөле ыдырайды, бұл өз кезегінде балқыған Ва–Cu–O ортасын тотыға түсуге және Y-123 фазасының түзілуіне септігін тигізеді.

N_2O қатысында жүреді деп болжанған қатты фазалық синтез реакциясы теңдеумен өрнектеледі:

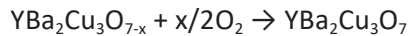


Бұл зерттеу әртүрлі ұсталу уақытының композиттің фазалық құрамы мен микроқұрылымына әсерін анықтауға бағытталды.

2.4. Оттегі атмосферасында күйдіру

Негізгі күйдіруден кейін үлгілер 920 °С температурада 12 сағат бойы таза оттегі ағынында (278 мл/мин) қосымша оттектендірілді. Бұл қадам Y-123 фазасындағы оттегі стехиометриясын қалпына келтіріп, ортотомбтық құрылымды тұрақтандыру үшін қажет (сурет-3).

Құрылымдағы оттегідефицитті фазаны оттегімен толықтыру төмендегі реакциямен көрсетіледі:



Синтез аяқталған соң үлгілер пеш ішінде шамамен 10 °С/мин жылдамдықпен баяу салқындалды. Пісіп жетілген композиттер тығыз қара-сұр түсті құрылым түзді және фазалық, микроқұрылымдық әрі асқынөткізгіштік сипаттамаларын (XRD, SEM, T_c , J_c , χAC) талдау үшін зерттеуге жіберілді.

Жоғарыда сипатталған барлық әдістер мен есептеу тәсілдері алынған нәтижелердің сенімділігі мен қайталанғыштығын қамтамасыз етеді.



Сурет 3. Оттегі (O_2) берілген кездегі вакуумды түтікше пештің жұмыс сызбасы.

3. Нәтижелер және оларды талқылау

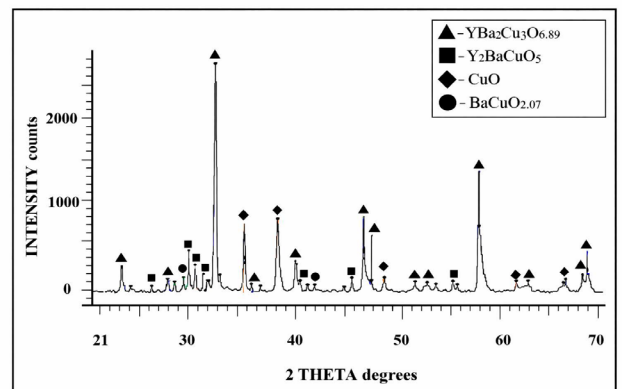
3.1. Рентгенофазалық талдау (XRD)

Фазалық құрам дифрактограммалардағы негізгі рефлекстердің салыстырмалы интенсивтіліктерін талдау арқылы жартылай сандық түрде анықталды. Дифракциялық деректер стандартты ICDD PDF базасымен салыстырылып сәйкестендірілді. Толық Rietveld талдауы жүргізілген жоқ, сондықтан алынған мәндер жуық сипатқа ие. Дифрактограммаларды өңдеу кезінде фондық сигнал алынып тасталып, негізгі пиктер идентификацияланды және олардың интегралдық интенсивтіліктері салыстырылды. N_2O атмосферасында 8, 10 және 12 сағат ұсталып, қатты фазалық синтез әдісімен синтезделген YBCO үлгілерінің рентгенофазалық талдауы олардың фазалық құрамында елеулі айырмашылықтар бар екенін көрсетті.

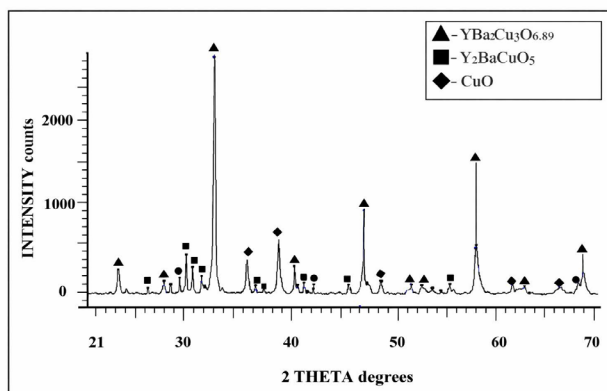
- 1-үлгі (8 сағат, N_2O): негізгі Y-123 фазасы ~70 масс.%, қосымша CuO – 16 ас.%, Y_2BaCuO_5 (Y-211) – 9 масс.%, ал $BaCuO_{2.07}$ ~4 масс.% шамасында (іздік мөлшерде). Екінші ретті фазалардың мұншалықты елеулі үлесі реакцияның толық жүрмегенін немесе синтез кезеңінде белсенді оттегінің жетіспегенін көрсетеді (сурет-4).

- 2-үлгі (10 сағат, N_2O): Y-123 фазасының мөлшері максимум ~88 масс.% дейін жетеді. Алайда үлгіде қосалқы CuO (~7 масс.%) және Y-211 (~5 масс.%) фазалары да бар. Бұл жергілікті артық тотығу әсерінің не N_2O берілуі кезіндегі газ динамикасының тұрақсыздығының салдары болуы мүмкін (сурет-5).

- 3-үлгі (12 сағат, N_2O): Y-123 фазасы ~76 масс.% деңгейінде, ал CuO – 13 масс.%, Y-211 – 10 масс.% шамасында анықталды. Тым ұзақ қыздыру Y-123 негізгі фазасының ыдырауына және қосалқы фазалар өсуіне алып келеді (сурет-6).



Сурет 4. 8 сағат N_2O атмосферасында ұсталған 1-үлгінің рентгендік дифрактограммасы.



Сурет 5. 10 сағат N_2O атмосферасында ұсталған 2-үлгінің рентгендік дифрактограммасы.

Барлық дифрактограммаларда $2\theta \approx 32-34^\circ$ және $38-41^\circ$ бұрыш аймақтарында Y-123 фазасына тән айқын піктер тіркелді, олар сәйкесінше (123) және (103) кристал жазықтықтарына сәйкес келеді. Y-211 қоспасының белгілері $2\theta \approx 28-30^\circ$ маңында, ал CuO – $35,5^\circ$ және $38,7^\circ$ маңында байқалады.

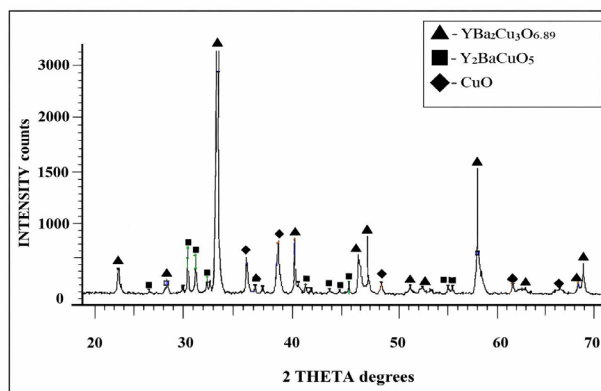
Төмендегі кестеде N_2O атмосферасында түрлі ұсталу уақытымен (8 сағ, 10 сағ, 12 сағ) синтезделген YBCO композиттерінің фазалық құрамы бойынша жартылай сандық бағалау келтірілген. Негізгі фаза – $YBa_2Cu_3O_{6,89}$ (Y-123), оған қосалқы фазалар ретінде CuO, Y_2BaCuO_5 (Y-211) және $BaCuO_2$ ілеседі. 10 сағат ұсталған үлгіде Y-123 фазасының құрамы барынша жоғары, ал қалған үлгілерде қосалқы фазалардың үлесінің артуы реакцияның толық жүрмегенін (8 сағ) не аса тотығыын (12 сағ) білдіреді.

Кесте 1. N_2O атмосферасында әртүрлі ұсталу уақытымен синтезделген YBCO үлгілерінің жартылай сандық фазалық құрамы

Фаза формуласы	1-үлгі (8 сағ)	2-үлгі (10 сағ)	3-үлгі (12 сағ)
$YBa_2Cu_3O_{6,89}$ (Y-123)	~70%	~88%	~76%
CuO	16%	7%	13%
Y_2BaCuO_5 (Y-211)	9%	5%	10%
$BaCuO_2$	4%	–	–

Ескерту: $YBa_2Cu_3O_{6,89}$ (Y-123) фазасы – негізгі асқынөткізгіш фаза. CuO мен Y-211 мөлшерінің жоғары болуы қосалқы фазалардың бар екенін көрсетеді. Ең жоғары фазалық тазалық 10 сағаттық ұсталу кезінде байқалды.

Фазалық құрамды бағалау жартылай сандық әдіспен жүргізілді. Негізгі фазалар үшін ең қарқынды рефлекстердің интегралдық интенсивтіліктері салыстырылып, олардың салыстырмалы үлестері есептелді. Толық Rietveld refinement қолданылған жоқ, сондықтан алынған мәндер жартылай сандық сипатқа ие.



Сурет 6. 12 сағат N_2O атмосферасында ұсталған 3-үлгінің рентгендік дифрактограммасы.

3.2. Микроқұрылымды талдау (SEM)

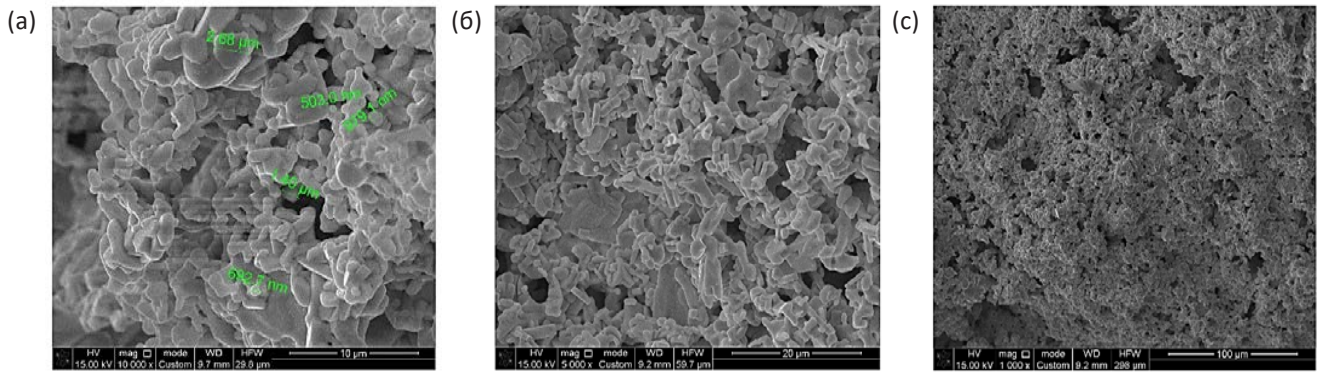
Әртүрлі ұсталу уақытымен N_2O атмосферасында синтезделген YBCO композиттердің микроқұрылымы сканерлеуші электронды микроскопия (SEM) әдісімен зерттелді. Микрофотосуреттер үш түрлі үлкейтуде алынды: $\times 1000$ (масштаб 10 мкм), $\times 500$ (20 мкм) және $\times 100$ (100 мкм).

- 1-үлгі (8 сағ, N_2O): SEM суреттерінде айқын кеуектілік және құрылымның біртексіздігі байқалады. Бөлшектердің пішіні мен өлшемдері әртүрлі, олар нашар байланысып күйдірілген, араларында саңылаулар бар және фазалар біркелкі таралмаған. Ұсақ бөлшектер жентектеу үшін энергияның жеткіліксіз болғанын немесе реакцияның толық аяқталмағанын көрсетеді.

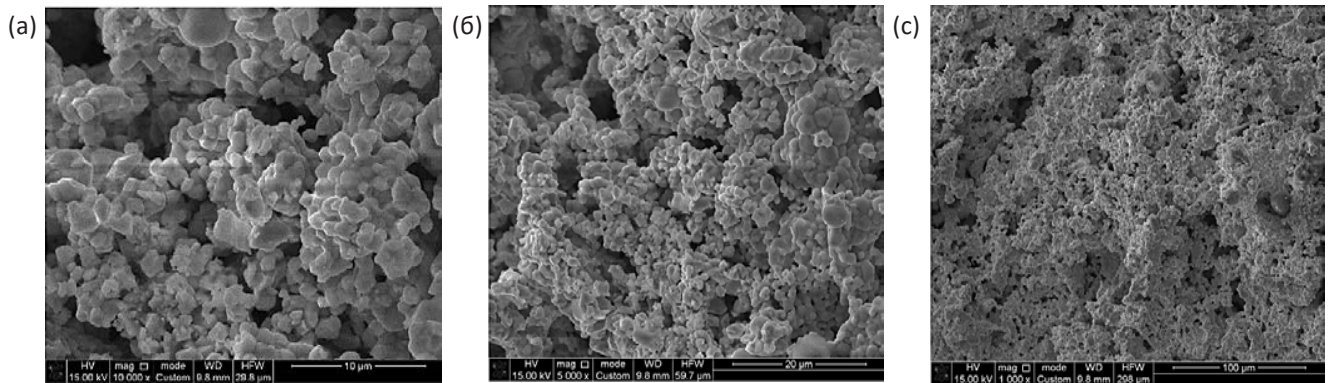
- 2-үлгі (10 сағат, N_2O): Құрылымы ең тығыз әрі біртекті. Бөлшектер жақсы бірігіп пісірілген, дән шекаралары айқын көрінеді. Орташа дән өлшемі $\sim 2-5$ мкм. Минимал кеуектілік және тығыз оралым мұндай жағдайда синтез шарттарының оңтайлы болғанын көрсетеді.

- 3-үлгі (12 сағат, N_2O): Дәндердің өсуіне қарамастан, құрылымда деградация белгілері байқалады: үлгі борпылдақ, микрожарықтар пайда болған және фазалардың ретсіз орналасуы орын алған. Мұндай ұзақ қыздыру шамадан тыс тотығуға ұшыратып, тор құрылымын бұзуы мүмкін.

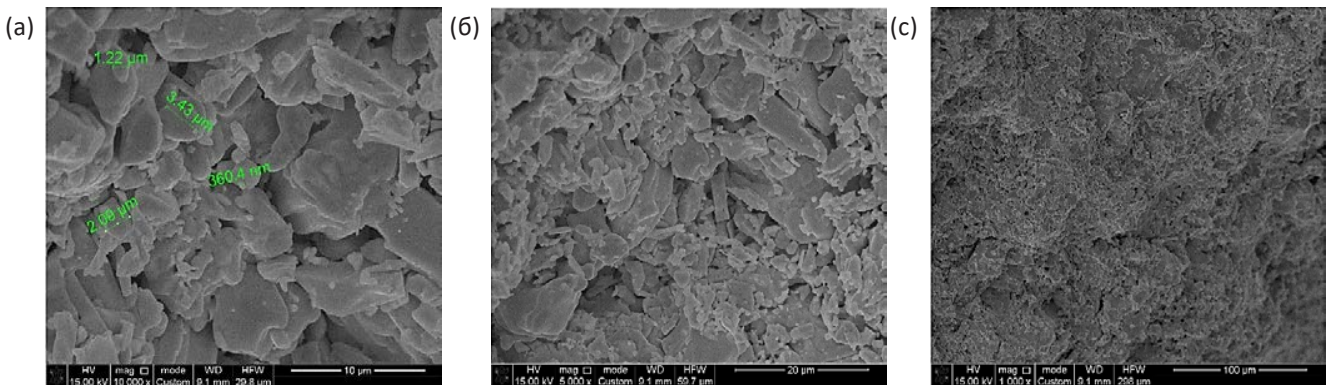
Жүргізілген микроқұрылымдық талдау нәтижелері N_2O атмосферасында жандыру ұзақтығын өзгерту YBCO композиттердің морфологиясына айтарлықтай ықпал ететінін көрсетті. 10 сағаттық ұсталу кезінде алынған құрылым ең оңтайлы: дәндер тығыз орналасқан, анық контурлы, құрылым біртекті және кеуектілік минималды. Бұл шарттар Y-123 асқынөткізгіш фазасының түзілуі үшін оңтайлы болып табылады.



Сурет 7. 8 сағат N_2O атмосферасында ұсталған YBCO 1-үлгінің SEM микрофотосуреттері: (а) $\times 1000$ (10 мкм), (б) $\times 500$ (20 мкм) және (с) $\times 100$ (100 мкм) үлкейтуде.



Сурет 8. 10 сағат N_2O атмосферасында ұсталған YBCO 2-үлгінің SEM микрофотосуреттері: (а) $\times 1000$ (10 мкм), (б) $\times 500$ (20 мкм) және (с) $\times 100$ (100 мкм) үлкейтуде.



Сурет 9. 12 сағат N_2O атмосферасында ұсталған YBCO 3-үлгінің SEM микрофотосуреттері: (а) $\times 1000$ (10 мкм), (б) $\times 500$ (20 мкм) және (с) $\times 100$ (100 мкм) үлкейтуде.

8 сағаттық экспозиция кезінде материалда жоғары кеуектілік және толық жентектеу жүрмегенін білдіретін ұсақ түйіршікті құрылым қалыптасады, бұл сыни ток тығыздығын төмендетіп, фазалар арасындағы байланыстылықты нашарлатады. Ал 12 сағаттық ұсталу нәтижесінде құрылымның деградациясы жүреді: микрожарықтар пайда болып, дәндер агрегацияланып, ретсіз орналасады, бұл, болжам бойынша, аса тотығу мен қызып кетудің салдары.

Демек, микроқұрылым тұрғысынан ең оңтайлы синтез шарттары – N_2O атмосферасында 10 сағат термиялық өңдеу жүргізу. Бұл режим тығыз әрі біртекті құрылым түзілуін қамтамасыз етеді және нәтижесінде материалдың асқынөткізгіштік қасиеттерінің жоғары болуына қолайлы жағдай жасайды.

8 сағаттық үлгіде дәндердің өлшемі шамамен 0.5-2 мкм диапазонында болып, олардың нашар біріктірілгені байқалады. Ал 12 сағаттық үлгіде

дәндердің шамадан тыс өсуі мен агломерациясы нәтижесінде олардың тиімді өлшемі 4-10 мкм диапазонына дейін жетеді және құрылымдық деградация белгілері анықталады. Көрсетілген мәндер SEM кескіндерін жартылай сандық бағалау негізінде анықталды. Бұл нәтижелер микроқұрылымның тығыздалуы мен дәндердің байланыстылығының артуы асқынөткізгіштік қасиеттердің, әсіресе критикалық ток тығыздығының (J_c), жақсаруына ықпал ететінін көрсетеді.

3.3. Магниттік өлшеулер және асқынөткізгіштік сипаттамаларын анықтау (PPMS)

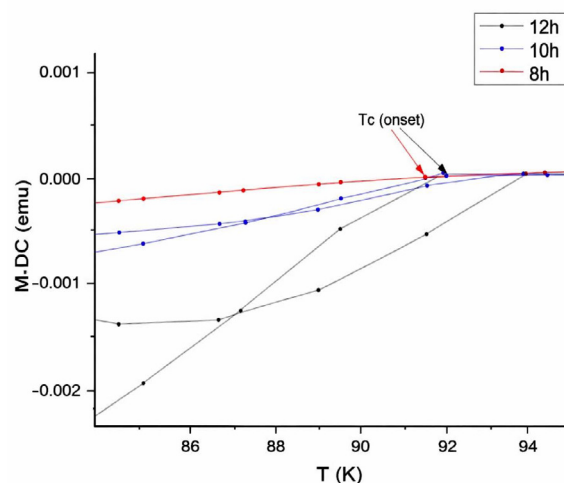
8, 10 және 12 сағат бойы N_2O атмосферасында күйдірілген $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) үлгілерінің магниттік қасиеттері Quantum Design PPMS қондырғысында тұрақты ток магнит өрісі режимінде зерттелді. Магниттік өлшеулер Quantum Design PPMS жүйесінде ZFC режимінде жүргізілді. Температура диапазоны 20-100 К аралығында, ал сыртқы магнит өрісі ± 10 Тл дейін өзгертілді.

Барлық үлгілерде шамамен 90-93 К диапазонында асқынөткізгіш күйге тән ауысу байқалады. Критикалық температура нормал және асқынөткізгіш күйлердің қисық бөліктеріне жүргізілген жанамалардың қиылысу нүктесі бойынша, сондай-ақ магниттік моменттің максимумына қарап анықталды. Үлгіні N_2O атмосферасында ұсталу уақытын 8 сағаттан 12 сағатқа ұзарту T_c шамасының сәл өсуіне (91.8 К-ден 92.5 К-ге) және өтпелі аймақтың X_{Tc} тарылуына әкеледі, бұл ұзақ уақыт тотықтырғыш ортада (N_2O) қыздыру нәтижесінде YBCO торында оттегі атомдарының реттелуінің жақсарғанын көрсетеді. Бұл әдеби деректерге сәйкес келеді, онда осындай әсерлер $Cu-O$ жазықтықтарындағы оттегі вакансиялары концентрациясының азаюымен және $YBa_2Cu_3O_7$ фазасы үлесінің артуымен түсіндіріледі (сурет-10).

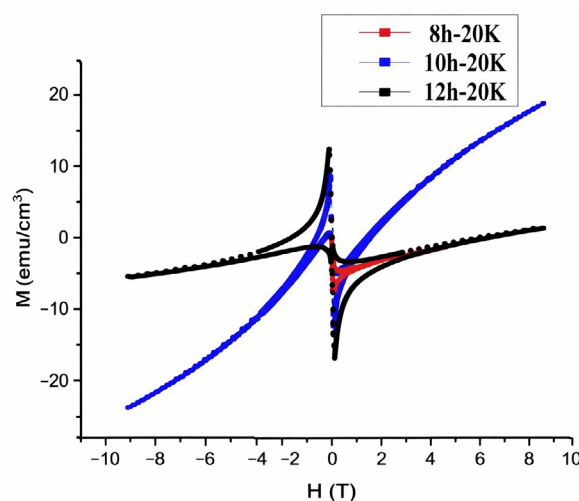
Кесте 2. Әртүрлі ұсталу уақытымен дайындалған үлгілердің T_c ауысу параметрлері

Үлгі (ұсталу уақыты, сағ.)	T_c (басталуы), К	T_c (ортасы), К	ΔT_c , К
8 сағат	91.8 ± 0.3	90.5	2.5
10 сағат	92.0 ± 0.3	90.7	2.9
12 сағат	92.5 ± 0.3	91.3	2.4
$BaCuO_2$	4%	—	—

± 10 Тл магниттік өріс аралығында 20 К температурада өлшенген магниттеліну гистерезис ілмектері 11-суретте көрсетілген. Барлық үлгілерде



Сурет 10. N_2O атмосферасында 8, 10 және 12 сағат ұсталған $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ үлгілерінің магниттік моментінің температураға тәуелділігі (ZFC режимі, $H = 5$ мТл).



Сурет 11. Барлық үлгілер үшін магниттеліну гистерезисінің қисықтары, 20 К температурада және ± 10 Тл сыртқы магнит өрісінде өлшенген.

II-текті асқынөткізгіштерге тән айқын диамагниттік жауап байқалды. Гистерезис ілмектерінің пішіні мен магниттеліну мәндеріндегі айырмашылықтар өлшеу температурасының өзгеруімен және үлгілердің микроқұрылымындағы ерекшеліктерімен байланысты.

20 К температурасында өлшенген 10 сағаттық үлгі гистерезис ілмегінің ең үлкен ауданын көрсетеді, бұл күшті құйын бекіту (пиннинг) қасиеттерін және жоғары сындарлы ток тығыздығын білдіреді.

20 К-де өлшенген 8 және 12 сағаттық үлгілерді салыстыру үлгілердің микроқұрылымдық ерекшеліктерінің асқынөткізгіштік қасиеттерге ықпалын көрсетеді. 12 сағаттық үлгідегі гистерезис ілмегінің ауданын ұлғаюы асқынөткізгіш дәндерінің кристалдылығының жоғарылауымен, дәнаралық байланыстардың күшеюімен және тиімді пин-

нинг орталықтарының болуымен түсіндірілуі мүмкін. Ал жоғары температураларда пиннинг қасиеттерінің нашарлауы магниттік құйындардың жылулық активациясымен және пиннинг орталықтарының тиімділігінің төмендеуіне байланысты. Үлгілердің магниттік мінез-құлқындағы бұл айырмашылықтар кең температура диапазонында оңтайлы асқынөткізгіштік сипаттамаларға қол жеткізу үшін микроқұрылым мен фазалық құрамды оңтайландырудың маңыздылығын көрсетеді.

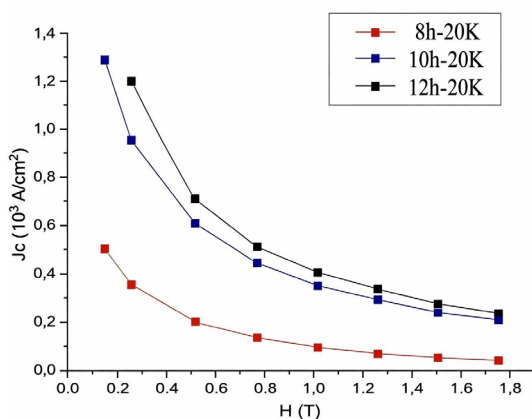
Талдау нәтижелері көрсеткендей, үлгілердің магниттік сипаттамаларындағы бұл айырмашылықтар кең температуралық диапазонда жоғары асқынөткізгіштік көрсеткіштерге қол жеткізу үшін микроқұрылымды және фазалық құрамды оңтайландырудың маңызды екенін дәлелдейді.

Критикалық ток тығыздығы (J_c) Bean моделіне сәйкес есептелді. Есептеу кезінде үлгінің тікбұрышты геометриясы ескеріліп, оның өлшемдері (a және b) нақты өлшенді ($a > b$). Магниттеліну мәндері гистерезис ілмектерінен алынған. Үлгілердің геометриялық өлшемдері штангенциркуль көмегімен өлшеніп, J_c есептеу кезінде пайдаланылды. Үлгілердің критикалық ток тығыздығы 20 K температурада тікбұрышты қимасы бар үлгі үшін Bean моделі бойынша есептелді (1):

$$J_{c, mag} = \frac{20 \times \Delta M}{b \times \left(1 - \frac{b}{3a}\right)} \quad (1)$$

Мұндағы: J_c – критикалық ток тығыздығы (A/cm^2); $\Delta M = M^+ - M^-$ – гистерезис ілмегінің жоғары және төмен тармақтарындағы магниттік момент айырмасы ($\text{эму}/\text{см}^3$), a және b – үлгінің көлденең қимасының өлшемдері, $a > b$ (см);

Сурет 12-де 8, 10 және 12 сағаттық үлгілер үшін, тиісінше 20 K температурада өлшенген, критикалық ток тығыздығы J_c -нің магнит өрісіне



Сурет 12. Барлық үлгілер үшін магнит өрісіне тәуелді критикалық ток тығыздықтары.

тәуелділігі келтірілген. J_c мәндері Bean моделі бойынша магниттеліну нәтижелерінен есептелді.

1,8 Тл-ге дейінгі өрістерде 20 K температурада өлшенген 10 сағаттық үлгі ең жоғары J_c мәндерін көрсетті және күшті өрістерде де салыстырмалы түрде жоғары деңгейді сақтап қалды. 12 сағаттық үлгі (20 K) J_c -нің біршама төмендеуін көрсетті, әсіресе 1 Тл-ден жоғары өрістерде. Ал 8 сағаттық үлгіде J_c барлық өріс диапазонында айтарлықтай төмендеді, бұл магниттік құйындарды бекіту тиімділігінің температураға тәуелді әлсіреуімен түсіндіріледі.

Айта кету қажет, бұл зерттеуде дәл осындай температура – уақыт режимінде таза O_2 атмосферасында толық синтезделген бақылау үлгісі қарастырылмаған. Алайда барлық үлгілер синтезден кейін бірдей шарттарда (920 °C, 12 сағ) O_2 ағынында постоксигенациядан өтті. Сондықтан фазалық құрам мен асқынөткізгіштік қасиеттердегі айырмашылықтар негізінен N_2O қатысындағы бастапқы жоғары температуралы синтез кезеңінің әсерін сипаттайды. Әдеби деректермен салыстыру көрсеткендей, 920 °C-та O_2 -де синтезделген YBCO материалдарында әдетте 75-85 масс.% Y-123 фазасы түзіледі. Біздің нәтижелер N_2O атмосферасының Y-123 фазасының тиімді қалыптасуына жеткілікті тотықтырғыш қабілет көрсететінін дәлелдейді. Болашақ зерттеулерде таза O_2 -де жүргізілген толық бақылау синтезі қарастырылатын болады.

Алынған нәтижелер N_2O атмосферасының «жұмсақ тотықтырғыш» ретінде әрекет ететінін көрсетеді. Оның O_2 -ге қарағанда төмен тотықтырғыш белсенділігі оттегінің біртіндеп бөлінуіне әкеліп, Y-123 фазасының тұрақты қалыптасуына және микроқұрылымның біртектілігінің артуына ықпал етеді.

4. Қорытынды

N_2O атмосферасында 920°C температурада жүргізілген қатты фазалық синтез Y123 фазасының қалыптасуына және оның микроқұрылымдық әрі асқынөткізгіштік қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететіні анықталды. 8 сағаттық өңдеу кезінде Y-123 фазасының үлесі шамамен ~70 масс.% құрап, CuO (~16 масс.%) және Y₂BaCuO₅ (~9 масс.%) фазаларының елеулі мөлшері сақталды. SEM талдауы бұл үлгіде жоғары кеуектілік пен толық қақтаудың жүрмегенін көрсетті. 10 сағаттық синтез барысында Y-123 фазасының үлесі максимум ~88 масс.% деңгейіне жетіп, CuO (~7 масс.%) және Y-211 (~5 масс.%) фазалары аз мөлшерде анықталды. Микроқұрылым тығыз,

біртекті және дән өлшемдері 2-5 мкм диапазонында болды. Бұл режим фазалық тазалық пен құрылымдық тығыздық тұрғысынан оңтайлы болып табылды. 12 сағаттық ұсталу кезінде Y-123 фазасының үлесі ~76 масс.% дейін төмендеп, ұзақ термиялық әсердің фазалық деградацияға және микроқұрылымда микрожарықтардың пайда болуына әкелетіні байқалды.

Барлық үлгілерде O_2 атмосферасында жүргізілген постоксигенация нәтижесінде асқынөткізгіштік ауысу температурасы $T_c \approx 91.8-92.5$ К диапазонында тіркелді. Ұсталу уақыты артқан сайын ΔT_c мәнінің аздап тарылуы тор құрылымындағы оттегінің реттелуінің жақсарғанын көрсетеді.

Магниттеліну гистерезисі негізінде есептелген критикалық ток тығыздығы J_c температураға тәуелді өзгеретінін көрсетті: 20 К-де 10 сағаттық үлгі ең жоғары J_c мәндерін көрсетті, бұл тиімді құйын бекіту орталықтарының болуымен байланысты.

Жалпы алғанда, N_2O атмосферасында 10 сағат ұсталу Y-123 фазасының максималды түзілуін, тығыз микроқұрылымды және тұрақты асқынөткізгіштік сипаттамаларды қамтамасыз ететін оңтайлы режим болып табылады. Алынған нәтижелер N_2O газын YBCO синтезінде тиімді баламалы тотықтырғыш орта ретінде қолдануға болатынын дәлелдейді.

Зерттеудің ғылыми маңыздылығы – YBCO тәрізді жоғары температуралы асқынөткізгіштерді синтездеу үдерісінде N_2O газын баламалы оттегі көзі ретінде қолдану тиімділігі туралы жаңа ғылыми мәліметтердің алынуында. Практикалық маңыздылығы – N_2O негізінде YBCO синтезін жүргізу жоғары сапалы асқынөткізгіш материалдарды дайындау үдерісін жетілдіруге және өндірістік синтез параметрлерін оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Авторлардың үлесі

Санат Төлендіұлы: Тұжырымдама, зерттеу, әдістеме, жазу – түпнұсқа жоба. **Сергей Фоменко:** Тұжырымдама, формальды талдау, әдістеме, жобаны басқару, ресурстар, қадағалау, тексеру, жазу – шолу және өңдеу. **Нұрсұлтан Рахым:** Деректерді құрациялау, зерттеу, визуализация. **Марина Бекджанова:** Деректерді құрациялау, бағдарламалық қамтамасыз ету. **Бейбит Карибаев:** Формальды талдау, әдістеме, ресурстар, Жазу – шолу және өңдеу. **Шарафхан Әсілхан:** Тергеу, Жазба – түпнұсқа нобай. **Әйгерім Совет:** Тергеу, Валидация, Жазу – шолу және редакциялау. **Қарақат Болатжан:** Тергеу, бағдарламалық қамтамасыз ету, визуализация.

Мүдделер қақтығысы туралы мәлімдеме

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

Алғыс

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасының Ғылым және Жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті (Грант № AP26195337) тарапынан қаржыландырылды.

References

- [1]. Y. Wang, Z. Zhang, Z. Gao, L. Wang, Q. Wang. Exploring the preparation of YbBa₂Cu₃O_{7-y} superconductor in flowing oxygen atmosphere. *Scientific Reports* 14 (2024) 8949. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59829-3>.
- [2]. B. Zhang, Q. Zhang, P. He, Y. Ma, L. Shen, et al. Efficient Fabrication of Ultralight YBa₂Cu₃O_{7-x} Superconductors with Programmable Shape and Structure. *Advanced Functional Materials* 31 (2021) 2100680. <https://doi.org/10.1002/adfm.202100680>.
- [3]. S. Tolendiyul, A. Sovet, M. Sadykov, S.M. Fomenko, A. Akishev, et al. Effect of mechanical activation parameters on the formation of superconducting phase in YBCO composite. *Combustion and plasma chemistry* 22 (2024) 241-250. (In Russ.). [https://doi.org/10.18321/cpc22\(3\)241-250](https://doi.org/10.18321/cpc22(3)241-250).
- [4]. V. Antal, D. Volochová, K. Zmorayová, M. Radušovská, P. Diko. Thermal Decomposition of Y123 Powder and TSMG Y123 Bulk Superconductors in Low Oxygen Atmosphere. *Physics Procedia* 45 (2013) 49-52. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.04.049>.
- [5]. M. Başoğlu. The effect of sintering in different atmospheres on superconductivity parameters of YBCO. *Turkish Journal of Physics* 41 (2017) 91-94. <https://doi.org/10.3906/fiz-1608-13>.
- [6]. M. Başoğlu, İ. Düzgün. Improvement of Current Density of Different Atmosphere-Sintered Y358 Superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 29 (2016) 1737-1740. <https://doi.org/10.1007/s10948-016-3481-7>.
- [7]. A. Sedky. Oxygen purity effect oxygen deficiency by argon heat treatment on Y:123 superconductors. *Physica B* 410 (2013) 233-236. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2012.11.014>.
- [8]. U. Balachandran, R.B. Poeppel, J.E. Emerson, S.A. Johnson, M.T. Lanagan, et al. Synthesis of phase-pure orthorhombic YBa₂Cu₃O_x under low oxygen pressure. *Materials Letters* 8 (1989) 454-458. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.03.044>.

- [9]. S. Hong, H. Cheong, G. Park. Raman analysis of a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin film with oxygen depletion. *Physica C: Superconductivity* 470 (2010) 383-390. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2010.02.089>.

Авторлар туралы мәліметтер

С. Төлендіұлы – PhD, қауымдастырылған профессор, Жану проблемалары институты, «ӨЖС – жаңа материалдар» зертханасының меңгерушісі, Алматы, Қазақстан
E-mail: sanat_tolendiuly@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1965-7187>

С.М. Фоменко – х.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Жану проблемалары институты, «ӨЖС – жаңа материалдар» зертханасының ғылыми жетекшісі, Алматы, Қазақстан
E-mail: exotherm@yandex.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1747-9316>

Н.Т. Рахым – PhD докторант, әл-Фараби ат. ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан
E-mail: rakhymnursultan17@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7894-6183>

Ш.Д. Әсілхан – магистр, Жану проблемалары институты, «ӨЖС – жаңа материалдар» зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан
E-mail: sharif29xxxx.10@gmail.com

Б.А. Карибаев – PhD, доцент, әл-Фараби ат. ҚазҰУ, материалтану және жаңа материалдар кафедрасы, Алматы, Қазақстан
E-mail: beibitkaribaev7@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1057-0296>

Ә.Б. Совет – магистр, Жану проблемалары институты, «ӨЖС – жаңа материалдар» зертханасының ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан
E-mail: sovet.aygerim@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5543-5795>

М.Т. Бекджанова – Жану проблемалары институты, «ӨЖС – жаңа материалдар» зертханасының ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан
E-mail: marina-3112@mail.ru

Қ. Болатжан – PhD докторант, әл-Фараби ат. ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан
E-mail: bolatzhan_karakat@kaznu.edu.kz
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7307-9007>

Effect of Nitrous Oxide on the Superconducting Properties of YBCO Composite Synthesized by the Solid-Phase Synthesis Method

S. Tolendiuly^{1*}, S.M. Fomenko¹, N.T. Rakhym^{1,2}, Sh.D. Asylkhan¹, B.A. Karibayev^{1,2}, A.B. Sovet¹, M.T. Bekjanova¹, K. Bolatzhan^{1,2}

¹Institute of Combustion Problems, Bogenbay Batyr Str., 172, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave., 71, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

This study explores the effect of nitrous oxide (N₂O) on the synthesis of high-temperature superconductor YBCO via the solid-phase synthesis method. Due to its ability to decompose at high temperatures and release oxygen, N₂O was considered a potential alternative oxygen source. The material underwent thermal treatment in an N₂O atmosphere for 8, 10, and 12 h, followed by post-oxygenation in an O₂ flow. The phase composition and structure were analyzed using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), while the superconducting properties were evaluated through magnetic measurements using the PPMS system. The sample treated for 10 h exhibited predominant Y-123 phase formation, enhanced microstructural densification, a superconducting transition temperature up to 91.8 K, and a strong diamagnetic response. These findings demonstrate the viability of using N₂O as an alternative oxidizing agent in the synthesis of high-temperature superconductors.

Keywords: YBCO, N₂O atmosphere, solid-phase synthesis, superconductor

Влияние закиси азота на сверхпроводящие свойства композита YBCO, синтезированного методом твердофазного синтеза

С. Төлөндүлы^{1*}, С.М. Фоменко¹, Н.Т. Рахым^{1,2}, Ш.Д. Әсілхан¹, Б.А. Карибаев^{1,2}, А.Б. Совет¹, М.Т. Бекджанова¹, Қ. Болатжан^{1,2}

¹Институт проблем горения, ул. Богдабай батыра, 172, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

В данной работе исследовано влияние закиси азота (N₂O) на процесс получения высокотемпературного сверхпроводника YBCO методом твердофазного синтеза. Благодаря термическому разложению N₂O с выделением кислорода данный газ рассматривали как альтернативный источник кислорода. Материал подвергали термообработке в атмосфере N₂O в течение 8, 10 и 12 ч с последующей постоксигенацией в потоке O₂. Фазовый состав и структура исследованы методами рентгенофазового анализа (XRD) и сканирующей электронной микроскопии (SEM), сверхпроводящие свойства – с помощью магнитных измерений на комплексе PPMS. Показано, что образцы, обработанные в течение 10 часов, характеризуются преобладанием фазы Y-123, более плотной микроструктурой, повышением температуры сверхпроводящего перехода до 91,8 К и выраженной диамагнитной реакцией. Полученные результаты подтверждают эффективность применения N₂O в качестве альтернативного окислителя при синтезе высокотемпературных сверхпроводников.

Ключевые слова: YBCO, атмосфера N₂O, твердофазный синтез, сверхпроводимость