

3D БАСЫП ШЫҒАРУ МАТЕРИАЛДАРЫ: ЭНЕРГИЯ СЫЙЫМДЫ МАТЕРИАЛДАРДЫ ТАҢДАУ

Г.М. Наурзбаева^{1,2}, Ш.Т. Сұлтанхан^{1,2}, М. Нажипқызы^{1,2}, Дж.Р. Митчелл^{3,4}

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр көшесі 172, Алматы, Қазақстан

²эл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, эл-Фараби даңғ. 71, Алматы, Қазақстан

³Лейрия политехникалық институты, Генерал Нортон де Матос көшесі, 2411-901, Лейрия, Португалия

⁴Өнімнің тез және тұрақты дамуы орталығы, Руа де Португалия көшесі, 2430-028, Марина Гранде, Португалия

Дата поступления:

5 Ноября 2019

Принято на печать:

10 декабря 2019

Доступно онлайн:

26 декабря 2019

УДК: 662.111

АНДАТПА

Соңғы жылдары аддитивті өндіріс (АӨ) деп аталатын 3D-басып шығару әдістері өнеркәсіптік өндіріс және прототиптеу салаларында дәстүрлі қолданулар шеңберінен асып шықты. Бұл мақалада энергия сыйымды (энергетикалық) материалдарға қысқаша шолу жасалады, сондай-ақ аддитивті өндіріс технологиялары үшін жиі қолданылатын материалдарға қысқаша талқылау берілді. Эксперимент барысында біз 3D басып шығару ыңғайлы энергия сыйымды материал термит алынды, ал байланыстырғыш ретінде нитроцеллюлоза таңдалынды. TERRA әмбебап бағдарламасы арқылы газдандыру үрдістеріне термодинамикалық талдау жүргізілді. Сонымен қатар, әр түрлі қатынастағы энергия сыйымды материалдар зерттелді. Біздің мақсатымыз 3D басып шығаруға лайықты энергия сыйымдылығы жоғары материалды таңдау.

Түйінді сөздер: аддитивті өндіріс, энергия сыйымды (энергетикалық) материалдар, 3D басып шығару.

Кіріспе

Пиротехника - бұл әскери, азаматтық адамдар-да кең қолданылатын, жарықтың, жылу, дыбыс және түтіннің және т.б. ерекше әсерлерді тудыратын энергетикалық материалдардың түрлері [1–4]. Әдетте пиротехникалық композициялар тотықтырғыш пен отын қоспасынан тұрады. Пиротехникалық құрамдардың реакциясы мен қасиеттерін анықтаудағы маңызды параметрлердің бірі - тотықтырғыш пен отын арасындағы жанасу. Көптеген пиротехникалық реакциялар қатты-қатты және қатты-газды реакция жолдарын қамтығандықтан, қатысушы бөлшектердің тығыз байланысы реакциялар кезінде масса мен жылу берілуіне ықпал етеді, осылайша жану үрдісінің негізгі қасиеті жақсарады. Тиімді араластыру әдісі мен технологиясын жасаудан басқа, композитті материалдарды дайындау жоғары өнімді пиротехниканы алуға өте ыңғайлы шешім ретінде қарастырылады [5]. Композиттің құрылымын саналы түрде ойластыра отырып, тотықтырғыш пен отын арасындағы байланыс, және осылайша энергия босату қасиетін едәуір жақсартуға болады [6].

Аддитивті өндіріс - бұл нысанды «салу» үшін материалды үздіксіз қосу арқылы қажетті кескіндерді құратын материалдарды өңдеу әдістерінің жиынтығы. Әдетте материал қабатты қабаттау үрдісін қолданып компонентке қосылады. Өңдеу, фрезерлеу сияқты субтративті әдістерден айырмашылығы, аддитивті өндіріс күрделі геометрияларды шығаруға мүмкіндік беретін төменнен жоғары геометрия салады. Үрдіс полимерлерді, металдарды және керамиканы қоса материалдардың кең спектрін қолдануға мүмкіндік береді. Ағымдағы зерттеулер басып шығару ажыратымдылығы мен жылдамдығын жоғарылату кезінде 3D басып шығаратын үйлесімді материалдар жиынтығын кеңейтуде.

Қазіргі кезде энергия сыйымды (энергетикалық) материалдарды зерттеу үрдісі, оны аддитивті технологияларда қолдану кеңінен таралуда. Оның негізгі себептерінің бірі энергия сыйымды материалдарды зымырандық отын ретінде пайдалану тиімділігі жоғары. Энергетикалық қатты отын ретінде металл нанобөлшектерін қолданатын қатты зымыран отындарын дайындауда энергия бөлу жылдамдығын арттыратын жаңа материалдарды іздеу болашақтың еншісіне айналды.

Соңғы жылдары наноөлшемді энергетикалық металдарды зерттеу, дәстүрлі химиямен салыстырғанда химиялық энергияның теориялық жоғары тығыздығына негізделген. Наноөлшемді отынды және тотықтырғышты пайдаланатын заманауи құрамдар 2,4,6-тринитротолуол (ТНТ) секілді молекулярлық монопропеллентке ұқсас болу үшін реакциялық қабілетін арттыратын диффузиондық ұзындықтың ауқымын азайтуға және меншік бетті жоғарылатуға ұмтылады. Энергетикалық мақсаттар үшін металл бөлшектері ретінде әдетте алюминийді пайдаланады. Себебі алюминий бөлшектері басқа наноөлшемді металл отындарына қарағанда экономикалық тиімді, жоғары жану энтальпиясына ие және салмағы жеңіл болып табылады [7].

Металл қоспаларын жану үрдісінде қолдануда жан жақты зерттеуді қажет етеді. Қоспаларды пайдалану кезінде, оларды кең көлемде қолдануда және зерттеуде келесі сипаттамаларды білу өте маңызды:

1. Металдық тұтану. Металдық тұтануды зерттеу, әдетте тұтану температурасын анықтаудан тұрады, бұл жану аймағындағы тұтану аймағының кеңістіктік орнын анықтауға мүмкіндік береді. Бұл температура қорғаныштық тотығу қабықшасының қасиеттеріне, қоршаған ортаның тотығу шамасына және металл бөлшектерімен қоршаған ортаның әрекеттесу жағдайларына байланысты.

2. Конденсацияланған өнімдердің пайда болуы және жанатын отынның беткі қабатындағы агломерация үрдісі. Конденсацияланған өнім-

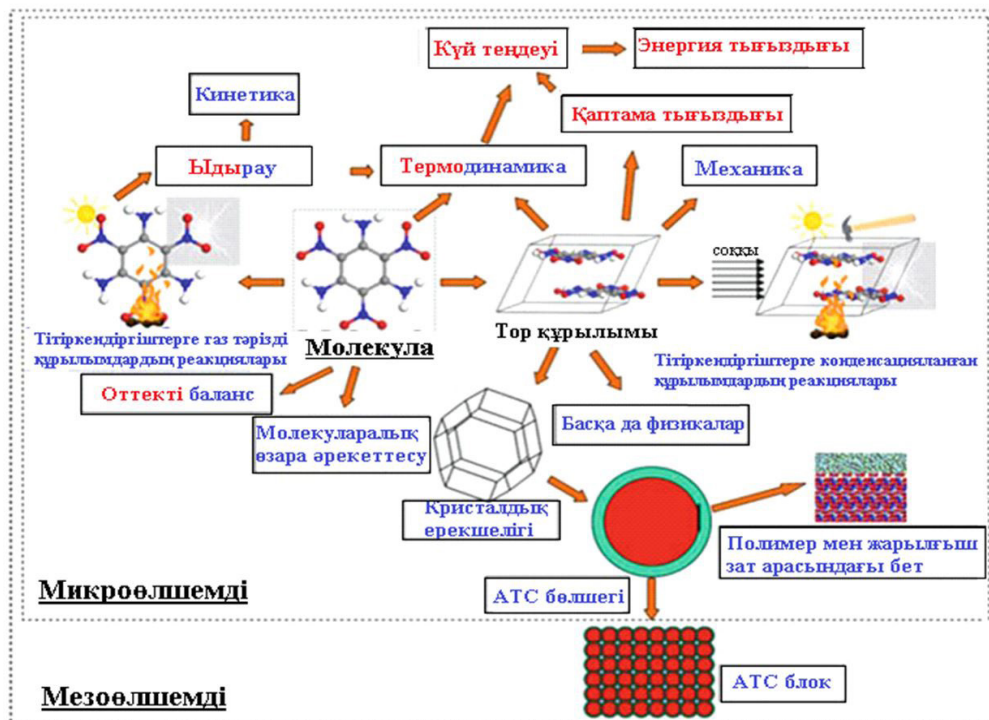
дер металдың жануы және агломерация үрдісінің аяқталуы нәтижесінде пайда болады. Бұл өнімдердің қасиеттері жанармайдың құрамына және олардың жану жағдайларына байланысты.

3. Металдың жану үрдісі. Металл бөлшектердің жану үрдісінің сипаттау үшін жанудың кинетикасын (бөлшектердің жану уақыты) сипаттау және жану өнімдерінің қасиеттерін анықтау үшін маңызды болып табылады.

4. Металл жануының отынның жану үрдісіне жалпы әсері. Беткі қабаттағы металл бөлшектерін тұтату және жану тұтану жағдайына және белсенді отынның жану жылдамдығы заңына айтарлықтай әсер етеді. Беттік қабатта металл бөліктерінің жануы және тұтануы қолданыстағы отынның жану жылдамдығы заңдылығына және тұтану шарттарына елеулі түрде ықпал етеді. Металл отынының қасиеттері мен оның қажетті мөлшері отынның жану жылдамдығына және оның бастапқы температура мен қысымға тәуелділігіне әсер етеді.

5. Екі фазалы ағымның жоғалуы. Бұл әрине барлық металдандырылған қатты отындармен байланысты ең маңызды шығын және нақты сипаттамалар үшін шешуші мәселе болып табылады. Соңғы нәтиже тек беткі қабаттың жану бөлігіне ғана емес, сонымен қатар саптаманың мойын аймағындағы тамшылар мен бөлшектерге байланысты гидродинамикалық және гидродинамикалық құбылыстарға да байланысты болады.

6. Қож түзілуінің жоғалуы. Бұл қозғалтқыш



Сурет 1. Энергия сыйымды (энергетикалық) материалдардың типтік микроқұрылымдары, оның ішінде атомдар, молекулалар, кристалдар, микробөлшектер, интерфейстер және т.б. [8]

элементтеріне конденсацияланған өнімдердің жинақталу құбылысы, ол зымыран қозғалтқышының массасының жетілуінің төмендеуіне әкеледі (зымыранның инертті массасының зымыран отынының массасына қатынасы). Бұл құбылыстың пайда болуы мен маңыздылығы негізінен агломерация үрдісінің сипаттамаларына байланысты (агломерацияға бастапқы металдың қатысу дәрежесі, агломерат мөлшері және оның құрылымы және химиялық құрамы) [8].

Энергия сыйымды (энергетикалық) материалдар - жылу, соққы, ұшқын және т.б. әсер еткенде, молекулалық құрылымдарында сақталатын химиялық энергияны, көбінесе, ыстық газ тәрізді өнімдер шығарылған кезде жоғары энтальпия түзе алатын материалдар ретінде қарастырылады [9]. Энергетикалық материалдардың типтік микроқұрылымы 1-ші суретте көрсетілген.

[10] жұмыстың авторлары металл бөлшектері ретінде алюминийді, полимерлі байланыстырғыш ретінде поливинилиденфторидті (ПВДФ) қолданған. Сонымен қатар термиттер жүйесі (металл/металл оксиді) түрлі қолдануда жоғары энергияны босату құралы ретінде және наноқұрылымды қолдану кезінде жалын жылдамдығы мен реактивтілігін жоғарылататын құрал ретінде бірнеше зерттеулердің басты назарында болды. Осы зерттеулерде металл оксидтері (МО), мыс оксиді (II), висмут оксиді (III) және темір оксиді (III) қолданылған. Еріткішті негізді дайындау кезінде термитті массаның жоғары мөлшері кеуектің ұлғаюына, жалын жылдамдығының азаюына, жалын температурасының жоғарылауына және энергияның бөліну жылдамдығының азаюына әкелген. Біріктірілген металл оксидтері алюминиймен ғана емес, сонымен қатар, ПДВФ ыдырау нәтижесінде пайда болған көміртегі бөлшектерімен де әсер етіп, CO_2 түрлендіріп және жүйедегі берілген өзара жоятын стехиометриялық баланстан ауытқыған. Al/ПДВФ және Al/МО кинетикасындағы айырмашылықтар, газ бөлінуінің артуы салдарынан үлдірлердің ыдырауы үлдірлердің жану тиімділігі үшін қолайсыз факторлар болып табылған. Сондықтан да, металл оксидтерінен басқа энергетикалық қоспалар болашақта жану жылдамдығын жоғарылату үшін энергетикалық емес қоспалармен толықтыруға болады.

[11] жұмыстың авторлары энергетикалық қоспаларға борды қолдануды қарастырған. Қатты отын ретінде борды қолдану оның ұзақ уақыт жану уақытымен, тұтанудың кідірісімен және жану тиімділігінің төмендігімен шектеледі. Бұл мәселелерді жою үшін В/нитроцеллюлоза (НЦ)/Fe бөлшектері электрлі бүрку әдісі арқылы дайындалған. Таза бормен салыстырғанда алынған бөлшектерді термиялық талдау кезінде тотығу температурасы төмен болған. Сонымен бірге дайындалған бөлшектер көп жылу бөлген және жану кезінде оңай тұтанған. Бұ-

дан бөлек В/НЦ/Fe бөлшектеріне жану тиімділігін тексеру үшін қоспа ретінде шеттік гидроксиль топтары бар полибутиадиен (НТРВ)/аммоний перхлораты қосылған. Ауадағы және жабық бомбадағы отынның жану жылдамдығы сәйкесінше 8,20 % және 117 %-ға жақсарған. Жалпы В/НЦ/Fe бөлшектері реакцияның тамаша сипаттамаларын көрсетіп қана қоймай, сонымен қатар, зымыран отынының жану жылдамдығының өзгеруіне ықпал еткен.

Жалпы алғанда, 3D-принтинг үрдісі жоғары экологиялық көрсеткіштерге ие. Себебі пайдаланылатын шикізат мөлшері азаяды, яғни, шикізат толығымен қолданылады. Қазіргі кезде Жану проблемалары институтында «3D-принтинг және IT-технология» ғылыми орталығы ашылды. Бұл ғылыми орталықта аддитивті өндіріс бағыты қарқынды дамуда [12-13].

Ұсынылып отырған жұмыстың мақсаты 3D-принтерге арналған энергия сыйымды материалдарды таңдау.

Әдістер мен материалдар

Энергия сыйымды материалдарды алу үшін жанғыш зат пен тотықтырғышты таңдалып алыну қажет. Ал материал басылып шығарылуы үшін бірнеше критерийлерге сай болуы қажет:

- Басып шығару үрдісі кезінде қоспа козғалғыш болуы қажет және басып шығарғаннан кейін пішінін сақтау үшін қатты күйге айналуы қажет;
- Қоспа құрамында жанғыш зат және тотықтырғыш болуы қажет;

- Қоспа белгілі диаметрдегі экструдерден өтуі қажет;

- Нөлдік оттегілік балансты алу үшін, жанғыш және тотықтырғыш құрамы бір-біріне сәйкес болуы қажет.

Оңтайлы құрамды алу үшін әдебиеттер қарастырылып, келесі қоспалар таңдалынып, сыналды.

- ABS + NH_4NO_3 – полимердің балқуына дейін аммоний нитраты балқып кетеді, ары қарай бірге қосып араластыру мүмкін емес.

- ABS + KNO_3 – құрамның эквивалентті қатынасына жеткенде құрам илгіштік қасиетін жоғалтады және балқу кезінде бірыңғай масса алынбайды.

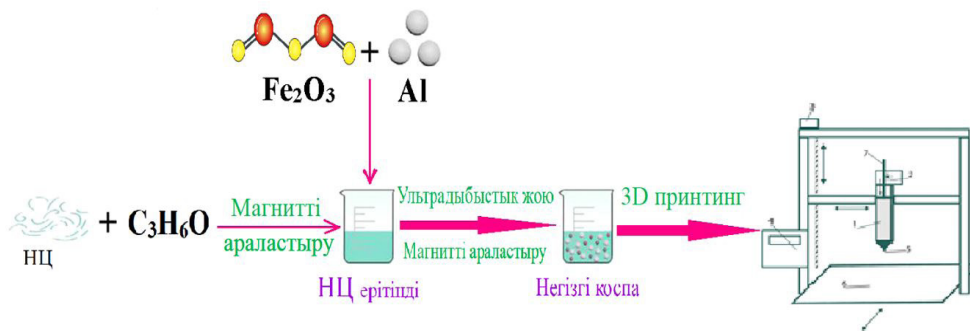
- PLA + NH_4NO_3 – аммоний нитратымен полимердің балқу температурасы бір біріне жақын, дегенменде жоғары температурада қыздыру кезінде бірыңғай масса алу мүмкін емес.

- PLA + KNO_3 – жалынмен иницирлеу кезінде қоспа жануды қолдамайды.

- Битум + KNO_3 – қоспаны экструдерден өткізу барысында $d=0,4$ мм экструдерді калий нитратының бөлшектері бітеп қалады.

- Битум + NH_4NO_3 – жалынмен иницирлеу болмайды.

- Нитроцеллюлоза (НЦ) + ацетон + термит ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}$) – осы қоспа зерттеуге өте қолайлы болды.



Сурет 2. НЦ/термит (энергетикалық материалдың) 3D принтингте түзілу сызбанұсқасы

Кесте 1

НЦ/термит әртүрлі концентрацияларындағы заттардың қатынасы

Арақатынас	1:1			1:9		
Реакцияға түсуші заттар	$C_{24}H_{30}O_{10}(NO_3)_{10}$	Fe_2O_3	Al	$C_{24}H_{30}O_{10}(NO_3)_{10}$	Fe_2O_3	Al
%, масс.	50	37.39	12.61	90	7.5	2.5

Тәжірибе барысында басып шығару үшін керамикалық қоспаларды басып шығару жүйесі неғұрлым қолайлы, себебі басып шығару кезінде бір-біріне полимерлер балқымасыз жүргізіледі. Құрғату үрдісінде тиімдірек, түтікшені бітеп қалмайтындай, ағынды 3D-басып шығару үшін бақылау реологиясы бар тұрақты суспензиялы қоспа қажет. Қазіргі уақытта экструдирлеу әдісі полимерлер мен қоспалардан керамикалық бұйымдарды жасалған өнімдерді басып шығару үшін қолданылады. Бұл жерде НЦ/термит бөлшегін алу үшін байланыстырғыш ретінде нитроцеллюлоза таңдалынып, экструдирлеу әдісі қолданылды. Алынған энергетикалық материалдың жану сипаттамалары қарастырылды. НЦ/термит бөлшектерінің дайындалу үрдісі 2-ші суретте көрсетілген.

лама бір уақытта көрсетілген тепе-теңдік күйінің мүмкін компоненттерін 200-ден дейін 500-ге дейін конденсацияланған газ тәрізді заттарды ескере отырып есептеулер жүргізуге мүмкіндік береді. Есептеудің әдістемесі негізі термодинамиканың іргелі заңдарымен, масса, заряд және энергияның сақталу заңдарымен қарастырылған. Бұл жабық термодинамикалық жүйелерде газ тәріздес және конденсацияланған заттардың, электрлік бейтарап және иондалған компоненттердің тепе-теңдігінде қалыптасудың жалпы жағдайының математикалық моделін құруға мүмкіндік береді.

Әр түрлі қатынастағы басып шығаруға арналған қоспаларды газдандыру үрдістерін есептеу (кесте 1) 0,1 МПа атмосфералық қысымда, кең интервалды 300-2000 К температурада жүзеге асырылды. Температуралық режим біріктірілген реактордағы сыртқы жылу көзінен энергия жеткізу есебінен сақталады деп болжалды.

Реактор ашық оқшауланбаған жүйе болып табылады және қоршаған ортамен энергия мен зат алмасады. Сыналатын заттың газдануы термодинамикалық модельдеу біріктірілген плазмалық реакторда мүмкін болады.

Біріншіден, эксперимент шарттары плазмалық реактордың пайдалы әсер етуінің термиялық коэффициентін есепке алу арқылы термодинамикалық тепе-теңдікке келтіріледі.

Екіншіден, реакция аймағында реагенттердің болу уақыты шамамен 1 секундты құрайды, бұл температуралық үрдістің жоғары деңгейі кезінде жүйеде термодинамикалық

Зерттеулері және нәтижелері

TERRA бағдарламалық жасақтама-сын қолдана отырып, нитроцеллюлоза-термит қоспасын газдандыруы есептелінді.

TERRA бағдарламасы жеке заттардың (газ тәріздес, иондалған және конденсацияланған күйдегі 3000-ға жуық заттар) қасиеттерінің мәліметтер базасымен байланысты, бұл бір уақытта 25-ке дейін химиялық элементтері бар жүйелерді қарастыруға мүмкіндік береді [14]. Есептеулерде қарастырылған конденсацияланған қосылыстар мен газ фазасының компоненттері мәліметтер базасынан автоматты түрде таңдалады және бағдар-

тепе-теңдікті орнату уақытынан бірнеше есе артық.

Үшіншіден, біріктірілген үлгідегі плазмалық реактор ағынды аппарат болып табылады және онда газдандыру үрдісінің квазистационарлығы қамтамасыз етіледі.

Есептеу үшін энергия сыйымды қоспаның келесі бастапқы құрамы алынды: 50 г нитроцеллюлоза, 50 г термит (12.61 г алюминий, 37.39 г темір).

Есептеу мақсаты газдандыру үрдісінің интегралды көрсеткіштерін анықтау: газдандыру өнімдерінің газ және конденсацияланған фазаларының тепе-теңдік құрамын анықтау болып табылады.

Жүйедегі температураға байланысты әртүрлі фазалар басым болады (3-сурет). Бастапқы температураларда C , H_2O , CO_2 басым болды. 1100 К температурадан өткен соң, CO , H_2 концентрациясы жоғарылайды. 3-ші суретте көрсетіліп тұрғандай, температураның артуымен конденсацияланған фазадағы көміртегінің концентрациясы бірте-бірте азаяды, ал 750 К температурада күрт төмендеп және температура 940 К болғанда толығымен жұмсалады. Температура 940 К кезінде барлық органикалық заттар газ тәрізді күйге, нақтырақ айтқанда CO және CO_2 -ге өтеді. Нәтижесінде, CO көбірек болып табылады, себебі осы температура диапазонында CO концентрациясы күрт өсуі байқалады. Бұл жағдай температураның жоғарылауымен сипатталады.

Ең маңызды үрдістер жүретін температура аралығын талдайық. Мәселен, 380 К температура шамасында Al_2O_3 түзілуін аяқтайды және температураның одан әрі жоғарылауы кезінде оның концентрациясы өзгермейді. Нәтижесінде, Fe_3O_4 , H_2O , CO_2 түзіліп, көміртегі концентрациясы азаяды.

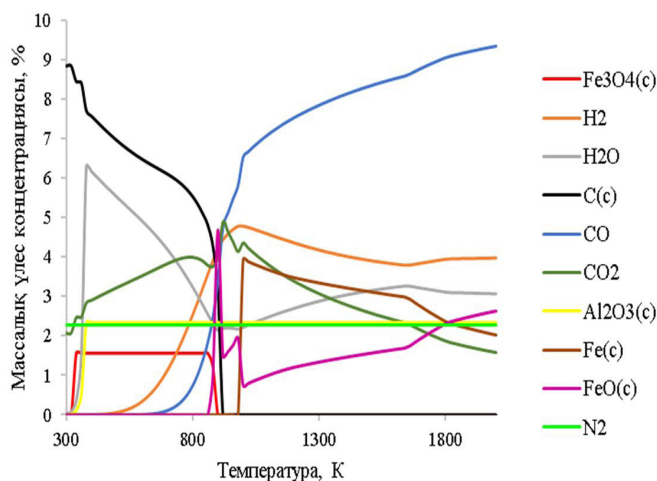
800-1000 К температура диапазонында FeO , CO_2 концентрацияларының ауытқуы байқалады. CO_2 ауытқуы оның CO -ға дейін ыдырауына байланысты және CO концентрациясының күрт жоғарылауынан болуы мүмкін. FeO концентрациясының күрт

артуы көміртегі коцентациясының күрт төмендеуімен сәйкес келеді. FeO түзілуі FeO көміртегімен және Fe_3O_4 қалпына келтірумен байланысты деп болжауға болады. Осы диапазонда CO_2 концентрациясының лезде артуы байқалады. 1000 К температурада көп мөлшерде Fe пайда болуы байқалады және ол 4 массалық үлеске дейін көтеріледі, одан әрі температура жоғарылағанда мөлшері азаяды, ал FeO концентрациясы керісінше артады.

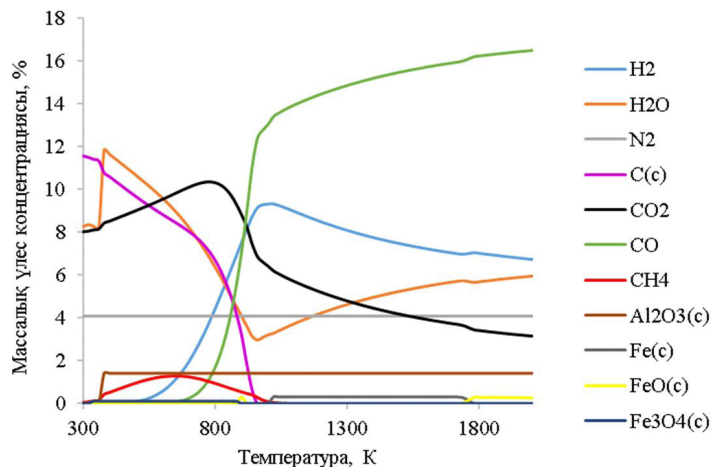
НЦ/термит 9:1 қоспасынан тұратын қоспаны есептеу үшін, келесі энергия сыйымды қоспаның келесі бастапқы құрамдары қабылданды: 90 г нитроцеллюлоза, 10 г термит (2.5 г алюминий, 7.5 г темір).

Компоненттердің өзара әрекеттесуін есептеу нәтижелерін қарастырайық (4-сурет). Газ фазасы негізінен газдандыру үрдісінің қосалқы өнімдеріне термодинамикалық төзімді CH_4 , CO , H_2 , CO_2 , H_2O , N_2 -ден тұратын газдардың қоспасы болып табылады. Конденсацияланған жүйелер негізінен C , Fe , Al_2O_3 , FeO , Fe_3O_4 тұрады. Көп жағдайда аралық үрдістер 800 К және одан жоғары температура аралығында жүреді, газ тәрізді құрамдардың концентрациясының күрт өсуі 800-900 К аралығында болады және 1000 К температурада H_2 және 800 К температурада CO_2 жоғары мәнге жетеді. Температураның өсуімен жүйенің конденсацияланған құрамдастарының концентрациясы төмендейді.

Температура 950 К кезіндегі көміртегі (C) концентрациясы 0-ге ұмтылады, ал температура 400 К кезінде Al_2O_3 1,5 массалық үлес концентрациясына жетеді және одан кейін температураның өсуі кезінде өзгеріс байқалмайды. Al_2O_3 концентрациясының күрт өсуі температура 400 К кезінде алюминийдің толықтай тотығуы орын алады, сонымен қатар сутегінің тотығуы бірге жүреді. Мұны концентрацияның 4 бірлік массалық үлеске күрт артуынан байқауға болады. Бұл жағдайды осы температурада нитроцеллюлоза құрамындағы нитрат



Сурет 3. НЦ/термит 1:1 массалық концентрациясының температураға тәуелділігі



Сурет 4. НЦ/термит 9:1 массалық концентрациясының температураға тәуелділігі

құрамдастарының тотығуымен түсіндіруге болады.

Температура жоғарылаған кезде кейбір заттардың концентрациясы алдымен өседі, содан кейін концентрациясы лезде төмендейді. Бұл заттарға H₂O, CH₄, Fe, FeO, H₂, CO₂ жатады. CH₄ концентрациясы температура 1000 К-ге дейін төмендейді, осы температурадан өткеннен кейін оның концентрациясы едәуір артады. Мұнымен бірге C және H₂ концентрациясы қатар төмендейді. 1000 К температура кезінде көміртек пен сутек арасында реакция пайда болады деп болжауға болады, соның нәтижесінде газ - метан түзіледі.

Температура 1000 К кезінде Fe концентрациясы 0,4 массалық үлеске артатынын көруге болады. Темірдің қалпына келуі CO газымен жүреді деп болжауға болады, себебі темір концентрациясының жоғарылауы аймағында CO концентрациясының динамикалық ауытқуы жоғарылайды.

Қорытынды

Бұл зерттеулерде 3D басып шығаруға жарамды энергия сыйымды материалдар талданды. Энергия сыйымды материалдардың ішіндегі ең тиімдісі Fe₂O₃, Al ұнтағы, байланыстырғыш ретінде нитроцеллюлоза қолданылды. Алынған материалдардың термодинамикалық талдау үрдістері TERRA әмбебап бағдарламасы арқылы жүзеге асырылды. Термитпен нитроцеллюлозаны бірге пайдалану, термитті қоспаның иницирлеу температурасын төмендетеді. Өртүрлі арақатынастағы НЦ/термит қоспалардың газификациялану үрдістері есептелінді. Есептеулер 300-2000 К температура аралығын қамтыды, дегенменде үрдістердің басым бөлігі 800-1000 К температурасында жүзеге асатындығы анықталды.

Әдебиеттер

- [1]. Carrico C.M., Gomez S.L., Dubey M.K., Aikenb A.C. Low hygroscopicity of ambient fresh carbonaceous aerosols from pyrotechnics smoke. *Atmos. Environ.* – 2018, 178. – P.101-108.
- [2]. Yin J.W., Zhao L.S., Du Z.M., Xing Q.F., Zhao Z.H. Study on combustion heat of pyrotechnics. *Procedia Eng.* – 2014, 84. – P.849-853.
- [3]. Lyons G.W., Raspert R. Chemical kinetics theory of pyrotechnic whistles. *J. Acoust. Soc. Am.* – 2015. 137. 2200.
- [4]. Poret J., Sabatini J. Comparison of barium and amorphous boron pyrotechnics for green light emission. *J. Energy Mater.* 2013, 31, –P. 27-34.
- [5]. Berger B. Parameters influencing the pyrotechnic reaction. *Propell. Explos. Pyrot.* 2005, 30. – P.27-35.
- [6]. Calais T., Bancaud A., Estève A., Rossi C. Correlation between DNA self-assembly kinetics, microstructure, and thermal properties of tunable highly energetic Al-CuO nanocomposites for micropyrotechnic applications. *ACS Appl. Nano Mater.* 2018, 1. – P. 4716-4725.
- [7]. De Lisio. Understanding the relationships between architecture, chemistry, and energy release of energetic nanocomposites, Department of Chemical and Biomolecular Engineering and Department of Chemistry and Biochemistry, University of Maryland, College Park, College Park, Maryland, 2017. – P. 194.
- [8]. Luigi T. De Luca, Toru Shimada, Valery P. Sinditskii, Max Calabro, and Anthony P. Manzara. An introduction to energetic materials for propulsion. – P. 58. – 2017.
- [9]. David I. A. Millar. Energetic materials at extreme conditions. Doctoral Thesis accepted by University of Edinburgh, UK. – 2012. – P. 232.
- [10]. Miles C. Rehwold, Haiyang Wang, Dylan J.Kline, TaoWu, Noah Eckman, Peng Wang, Niti R. Agrawa, Michael R. Zachariah. Ignition and combustion analysis of direct write fabricated aluminum/metal oxide/PVDF films // *Combustion and Flame.* – V. 211. – 2020. – P. 260-269.
- [11]. Long Cheng, Hongtao Yang, Yue Yang, Yifan Li, Yingyi Meng, Yanchun Li, Dongming Song, Houhe Chen, Ramón Artiaga. Preparation of B/Nitrocellulose/Fe particles

and their effect on the performance of an ammonium perchlorate propellant // *Combustion and Flame*, 211. – P.456-464.

- [12]. З.А. Мансуров, Е.Т. Алиев, Т.П. Дмитриев, Ч.Б. Даулбаев. Аддитивные технологии (3D Printing): монография. Алматы, Қазақ университеті, 2017, 191 с.
- [13]. Наурзбаева Г.М., Нажипкызы М., Жылыбаева Н.К., Мансуров З.А., Митчелл Дж. Р. Перспективы развития 3D-печати // *Горение и плазмохимия*, № 4, Том 17, 2019. С. 221-228.
- [14]. Gorokhovski M., Karpenko E.I. Plasma technologies for solid fuels: experiment and theory// *Journal of Energy Institute*. – 2005. – 78 (4). – P.157-171.

3D печатные материалы: выбор энергоемких материалов

Г.М. Наурзбаева^{1,2}, Ш.Т. Сұлтахан^{1,2}, М. Нажипкызы^{1,2}, Дж.Р. Митчелл^{3,4}

¹РГП на ПХВ «Институт проблем горения», ул. Богдабай батыра, 172, Алматы, Казахстан

²Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, г. Алматы, Казахстан

³Политехнический институт Лейрии, ул. Генерал Нортон де Матос, 2411-901, Лейрия, Португалия

⁴Центр быстрого и устойчивого развития изделия, ул. Руа де Португалия, 2430-028, Маринья Гранде, Португалия

АННОТАЦИЯ

В последние годы методы 3D-печати, также называемые аддитивным производством (АП) вышли за рамки своих традиционных применений в областях промышленного производства и прототипирования. В данной статье дается краткое обсуждение энергоемких (энергетических) материалов, а также наиболее часто используемых для технологий аддитивным производством. В процессе эксперимента мы получили подходящие энергоемкие материалы для 3D принтинга, термит, в качестве связующего мы использовали

нитроцеллюлозу. Проведены термодинамический анализ процессов газификации с универсальной программой TERRA. И были исследованы энергоемкие материалы в разных соотношениях. Наша цель заключается выбрать подходящего энергоемких материалов приспособленную 3D принтингу.

Ключевые слова: аддитивное производство, энергоемкие (энергетические) материалы, 3D-печать.

3D printing materials: selection energy intensive materials

G.M. Naurzbayeva^{1,2}, Sh.T. Sultakhan^{1,2}, M. Nazhipkyzy^{1,2}, G.R. Mitchell^{3,4}

¹The institute of combustion problems, Bogenbai batyr str., 172, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh national university, ave. Al-Farabi 71, Almaty, Kazakhstan

³Polytechnic institute of Leiria, General Norton de Matos str., 2411-901, Leiria, Portugal

⁴Centrefor rapid and sustainable product development, Rua de Portugal str., 2430-028, Marinha Grande, Portugal

ABSTRACT

In recent years, 3D printing techniques, also called as additive manufacturing (AM), have moved beyond their traditional applications in industrial production and prototyping. This article gives a brief discussion of energy-intensive (energetic) materials, as well as additive manufacturing most commonly used for technologies. In the process of experiment, we obtained suitable energy-intensive materials for 3D printing, thermite, we used nitrocellulose as a binder. Thermodynamic analysis of gasification processes with the universal TERRA program was carried out. And energy-intensive materials were investigated in different ratios. Our goal is to choose the right energy-intensive material for adapted 3D printing.

Keywords: additive manufacturing, energy intensive (energetic) materials, 3D printing.