

ӨОЖ 537.523.527.662.111.1
FTAMP 29.19.22

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-229-237>

^{1*} **Аймашева Ж.,**

PhD студент, ORCID ID: 0000-0002-6789-4876, e-mail: zhadyra_aimasheva@mail.ru

^{1,2,3} **Исмаилов Д.В.,**

т.ғ.к., PhD, ORCID ID: 0000-0002-6384-1478, e-mail: Ismailov_daniyar_v@bk.ru

⁴ **Грищенко В.Ф.,**

ф.-м.ғ.к., доцент, ORCID ID: 0000-0003-2244-5599, e-mail: labreab@mail.ru

⁵ **Stefano Bellucci,**

ORCID ID: 0000-0003-0326-6368, e-mail: bellucci@lnf.infn.it

¹ **Партизан Г.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7001-2654, e-mail: gulmayra.partyzan@kaznu.kz

⁶ **Коштыбаев Т.Б.,**

ф.-м.ғ.к., ORCID ID: 0009-0004-7344-6801, e-mail: koshtybayev.t@qyzpu.edu.kz

¹ әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, 050040, Алматы қ., Қазақстан

² «KazAlfaTech LTD» Зерттеу Орталығы, 050000, Алматы қ., Қазақстан;

³ Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050000, Алматы қ., Қазақстан

⁴ «Ионосфера институты» ЖШС, 050000, Алматы қ., Қазақстан

⁵ Laboratori Nazionali di Frascati, Via E. Fermi 54, 00044 Frascati, Italy

⁶ Қазақ ұлттыққыздар педагогикалық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан

МИКРО ЖӘНЕ НАНО МИКРО МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ПИРОТЕХНИКАДА ҚОЛДАНЫЛУЫ

Аңдатпа

Соңғы жылдары бірегей физикалық және химиялық қасиеттеріне байланысты пиротехникалық заттардың өнімділігі мен қауіпсіздігін арттыруда таптырмас рөл атқаратын көміртекті наноматериалдар зерттеушілердің қызығушылығын тудыруда. Бұл мақалада электрдоғалық синтез әдісімен алынған көміртекті нанокұрылымдардың C60 және C70 фуллерен күйелері екені анықталды. Синтезделген фуллерен күйе бөлшектерінің морфологиясы кеуекті және кедір-бұдырлы, ал ондағы күйе кеуектерінің өлшемі 32–190 нм аралығында болатыны анықталды. Тәжірибелердің нәтижесі бойынша синтезделген фуллерен күйелерін пиротехникалық композит құрамның құраушы компоненті ретінде пайдалану мүмкіндігі ұсынылды. Матрица ретінде калий нитраты, наноөлшемді фуллерен құрамды күйе, ағаш көмір мен алюминий толтырғыш таңдалып, пиротехникалық композиттік құрамдардың жану уақытына тәуелділігі анықталды. Нәтиже бойынша фуллерен құрамды күйе мөлшері пиротехникалық композиттік құрамда көбейген сайын, композиттік құрамның жану уақытының артатындығы анықталды.

Тірек сөздер: фуллерен, пиротехника, композит, газ фазасындағы доғалық разряд.

Кіріспе

Фуллерендерді қолдану молекулалық электроникадан биомедицинаға дейін кең таралған, магниттік қасиеттеріне байланысты резонанстық зерттеулерде сигналдарды күшейтетін гадолиний атомдарының орналасуы мен өріске қатысуына байланысты түзеткіштер ретінде қызықты қасиетке ие [1–2]. Қолдану аясы өте перспективалы болып көрінгенімен, молекулалық өңдеу кезінде өзекті мәселелер туындайды. Қазіргі уақытта фуллерендер ішінде атомдарды қалай қоршау және оларды қалпына келтіру жұмысын атқаратын организмнің белгілі бір нүктеге қалай бағыттау керек сияқты деген тәсілдер белгілі [3–4].

Фуллерендер ашылғаннан бері ғылымның әртүрлі салаларында қызығушылық тудыруда. Ерекше қасиеттері мен физикалық сипаттамалары – оларды ерекше бағаланатын материалға айналдырған фактор [5]. Фуллерен өнеркәсіпте әртүрлі тәсілдермен қолданылған, мысалы, Bardahl компаниясы бұл материалды оны майларға, атап айтқанда, үш қабатты қорғаныс қабатын қамтамасыз ететін Technos C60 майын өндіруге қосу үшін пайдаланды [6]. Оның әртүрлі қаптамалар, өткізгіш құрылғылар және молекулалық желілерді құру сияқты әртүрлі қолданбалары бар. Сонымен қатар медицина саласында суда еритін фуллерен адамның иммун талшығында пайда болуы мүмкін ЖИТС (СПИД) вирустарына қарсы белсенділік көрсетті, оны тіпті антиоксидант ретінде де қолдануға болады [7].

Көміртекті наноқұрылымның бұл модификациясының ерекше құрылымы, термиялық тұрақтылығы, жоғары беріктігі сияқты бірегей қасиеттерінің болуында екені белгілі. Және мұндай қасиеттер оларды әртүрлі салаларда, соның ішінде пиротехникада қолдануға мүмкіндік береді.

Пиротехника жанғыш агенттен, тотықтырғыштан, байланыстырғыштан және функционалдық қоспадан тұрады, олар тез әрекеттеседі және дыбыс, жарық, түтін және жылу сияқты көптеген әсерлерді береді [8–9]. Ол азаматтық және әскери салаларда кеңінен қолданылады, бірақ ресурстардың ысырап болуы, артық әсер ету, пайдалану және сақтау кезіндегі қауіпсіздік коэффициентінің төмендігі сияқты реагенттер реакциясының жеткіліксіздігінен туындайтын кейбір мәселелер бар. Сондықтан бұл пиротехникалық заттарды әзірлеу мен қолдануда үлкен қиындықтар туғызады. Соңғы жылдары ғылыми-зерттеу және тәжірибелік-конструкторлық жұмыстар мен жаңа наноматериалдарды дайындау технологиясының қарқынды дамуы бұл мәселелерді біртіндеп шешті.

Негізгі ережелер. Әдебиетке шолу. Материалдар мен әдістер

Қазіргі таңда көміртекті наноқұрылымдарды, соның ішінде фуллерендердің синтезі үшін бірнеше әдістер қолданылады. Фуллерендерді синтездеудің айтарлықтай өте қарапайым және қолдануға оңай әдістердің бірі – газдық фазадағы доғалық разряд әдісі.

Бұл жұмыста газдық фазадағы доғалық разряд әдісімен алынған көміртекті наноматериалдардың пиротехникалық құрылымдардың толтырғыш компоненті ретінде пайдалану арқылы олардың жану параметрлеріне әсерін анықтау қарастырылды және бұл олардың мақсатты қолданылу аясын кеңейтуге мүмкіндік береді.

1-суретте (231 б.) микро және наноқұрылымдарды синтездеуге арналған газ фазасындағы доғалық разряд әдісі қондырғысының құрылымы ұсынылған. Қондырғы құрылымы қарапайым емес, ол газ қысымын басқару жүйесінен, доғалық разряд реакторынан, электродтарды салқындатуға арналған су ағынынан, генератордағы тұрақты тоқ пен реактор осінің бойындағы электродтардың араласу механизмінен және плазмадағы тұрақты тоқты бақылау сервоқозғалтқышынан тұрады. Бұл шаралар фуллерендерді сапалы синтездеу үшін және фуллерендер мен олардың туындыларының синтезінің плазмохимиялық процесінің оңтайлы шарттарын анықтау үшін қажет.

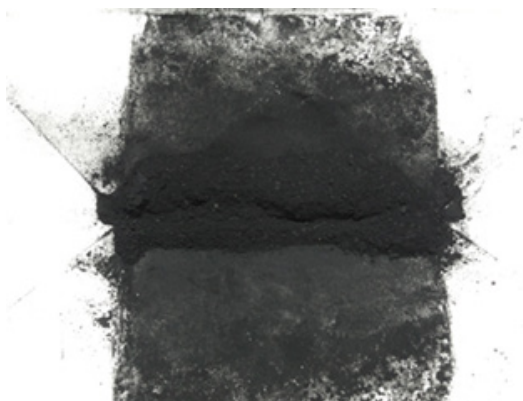
Графит электродтары ұстағышқа орнатылды. Содан кейін жинақпен және электродпен бірге реактор камерасы тығыз жабылды. Ары қарай реактор камерасы сорғымен 0,7 Па=(0.005 Торр) мәніне дейін вакуумдалды. Реакторды ағынды сумен 19–21°C температураға дейін салқындатуға арналған су қосылды.

Қажетті вакуум мәніне жеткенде электродтар қосылып, кернеу біртіндеп берілді, электродтарда резистивті жылу пайда болды және вакуум өзгерді. Қыздырылған кезде графит кеуектерінен газдар шығарылып, процесс вакуум тұрақты болғанға дейін жалғасты. Процесс барысында камера бірнеше рет инертті газ – гелиймен үрленеді. Ары қарай камера гелиймен 30,7 кПа қысым мәніне дейін толтырылды. Осыдан кейін синтез процесі басталды, ол графит электродтары арасындағы электр доғалық разрядқа негізделген.



Сурет 1 – Газ фазасындағы доғалық разряд әдісі қондырғысының құрылымы

Наноқұрылымды материалдарды синтездеу үшін доғалық әдіс әмбебап болып табылады. Электродтардың химиялық құрамын (электродтарды металдармен легирлеу) және жұмыс газының құрамын өзгерту арқылы әртүрлі құрылымға және морфологияға ие наноматериалдарды синтездеуге болады. Бұл әдіспен синтездеу барысында түзілген құрылымдар реактордың қабырғаларында және плазма түзетін электродтарда тұндырылады. 2-суретте доғалық разряд әдісімен синтезделген фуллерен күйесі мен катод материалына жиналған фуллерен күйесінің микросуреті бейнеленген.

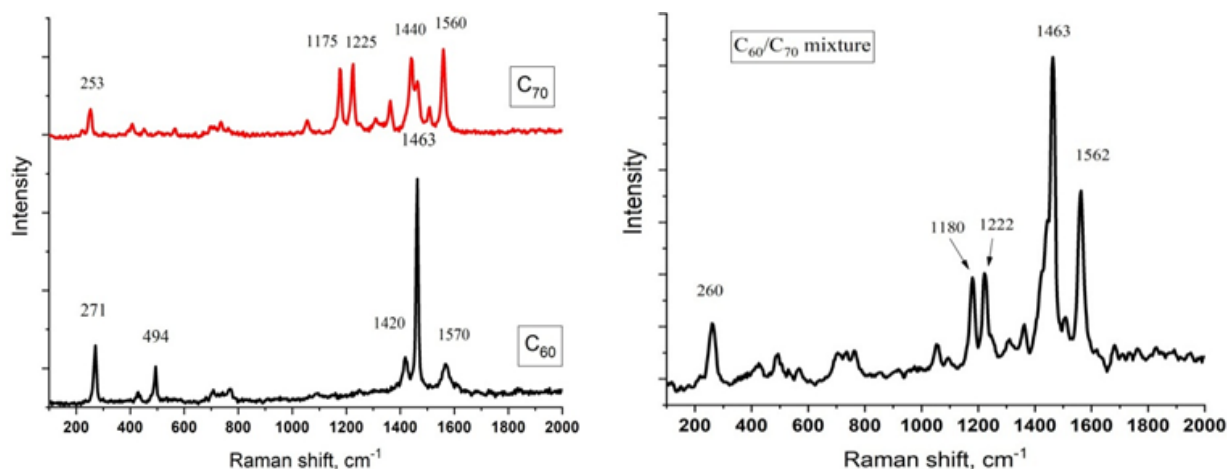


Сурет 2 – Синтезделген фуллерен күйесі (а) мен катод материалына жиналған фуллерен күйесінің (б) суреті

Нәтижелер мен талқылау

Алынған үлгілер Quanta 3D 200i микроскобында расторлы электронды микроскопия (СЭМ) арқылы және NT-MDT NTegra Spectra спектрометрін (лазерлік толқын ұзындығы $\lambda = 473$ нм) пайдалана отырып, Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертханада (Алматы, Қазақстан) Раман спектроскопиясы (RS) арқылы зерттелді. Сонымен қатар Hitachi TM4000 Plus Quantax 75 Bruker электрондық микроскобы арқылы композиттердің морфологиясы зерттелінді.

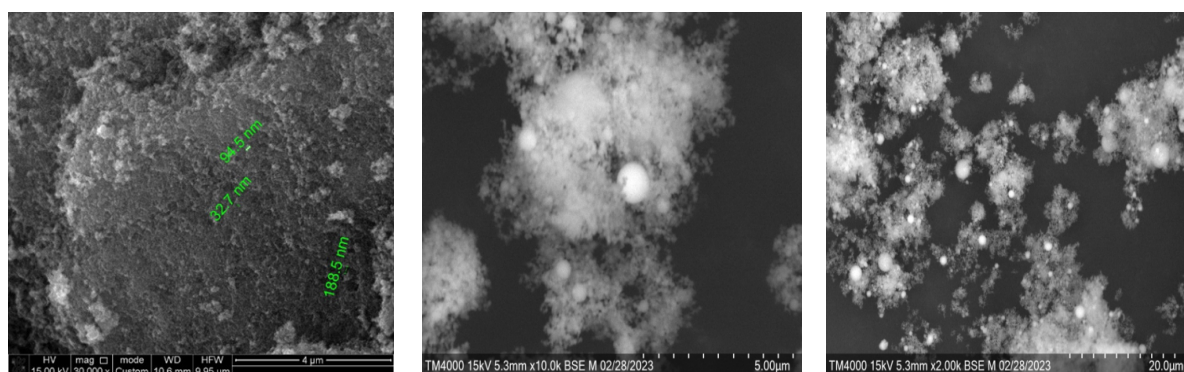
Келесі суретте фуллерен күйесінің Раман спектрлері бейнеленген.



Сурет 3 – Доғалық разрядта синтезделген фуллерен күйесінің жарықтың комбинациялық шашырау спектрлері

3а-суреттен (астыңғы спектр) спектрдің 271, 494, және 770 cm^{-1} аймақтарында C_{60} молекуласының Рамандық ығысуларына сай келетін шыңдарды көруге болады. D шыңы 1463 cm^{-1} аймағында орналасса, G шыңы 1570 cm^{-1} аймағында байқалады. Өз кезегінде 4а (үстінгі спектр) суретінен C_{70} молекуласына тән ығысу шықтарын 253, 488 және 770 cm^{-1} аймақтарында байқауға болады. Бұл спектр үшін D және G шыңдары сәйкесінше 1440 және 1560 cm^{-1} аймағында байқалады. 4б-суретінен синтезделген нанокұрылымның C_{60} және C_{70} молекулаларының қоспасынан тұратынын байқауға болады. Алайда спектрлердің ең қарқынды шыңдарын талдау үлгідегі C_{70} молекуласының басым екенін көрсетеді.

4-суретте фуллеренқұрамды күйенің СЭМ арқылы алынған бейнелері ұсынылған.



Сурет 4 – Фуллеренқұрамды күйенің СЭМ арқылы алынған бейнелері

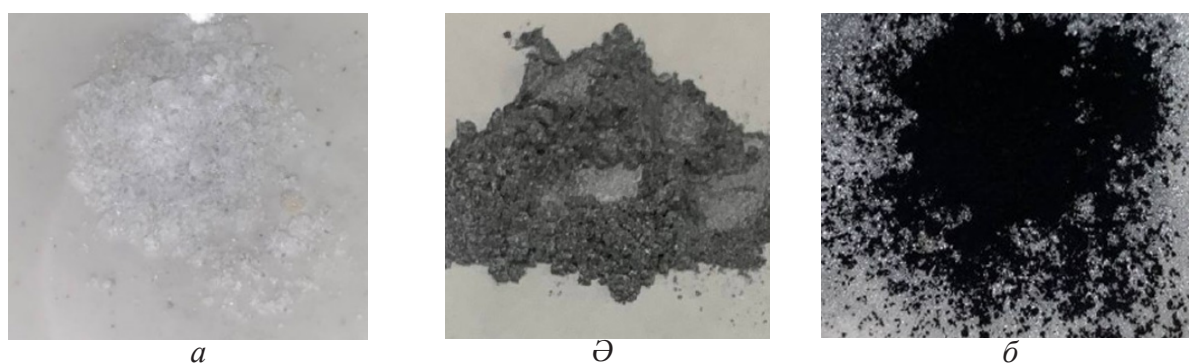
СЭМ бейнесінен байқалғандай күйе бөлшектерінің морфологиясы кеуекті және кедір-бұдырлы. Күйе кеуектерінің өлшемі 32–190 нм аралығында.

Пиротехникалық құрамдар – бұл өздігінен жануға қабілетті және жанған кезде жарық, түтін, жылу, дыбыс және басқа да әсерлер беретін гетерогенді қоспалар. Электрдоғалық синтез әдісімен алынған фуллерен күйелері пиротехникалық құрамның құраушы компоненті ретінде пайданылды. Пиротехникалық құрамның жануын жеңілдету және оның жану мүмкіндігін қамтамасыз ету үшін әдетте ауадағы оттегін пайдаланбайды, оның орнына меншікті тотықтырғыш – термиялық ыдырау кезінде оттегін құрайтын күрделі зат қолданылады. Біздің

жағдайымызда, жұмыста тотықтырғыш ретінде калий нитраты қолданылды. Бұл оның сақтау және танымалдау тиімділігіне байланысты, яғни, калий нитраты өзге тотықтырғыш материалдармен салыстырғанда жеке алынған калий нитраты жарылғыш қасиетке ие емес, өйткені оның ыдырауы өте аз жылу шығарумен жүреді.

Пиротехникалық құрамдардың екінші құрамдас бөлігі – жанғыш зат. Жанғыш заттар үлкен қосымша оттегі бөлуі немесе белгілі бір жану температурасын беруі тиіс. Жұмыста алюминий жанғыш зат ретінде пайданылды. Себебі ол жер қыртысында көп мөлшерде кездесетін қолжетімді кезінде жоғары қысымды қолдану арқылы композиттің жоғары беріктігіне қол жеткізу әрдайым мүмкін емес. Өнімдердің беріктігін арттыру үшін қосылыстарға байланыстырғыштар енгізіледі (кейде цементаторлар деп аталады).

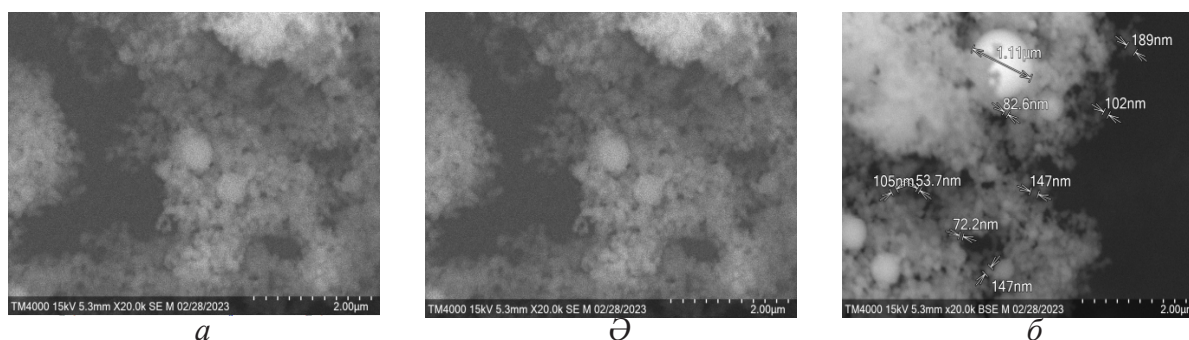
Пиротехникалық композиттің құрам компоненттері ретінде пайдаланылған калий нитраты, алюминий және синтезделген фуллерен күйесінің бейнесі келесі суретте ұсынылған.



а – калий нитраты, б – алюминий, в – синтезделген фуллерен құрамды күйе

Сурет 5 – Пиротехникалық композиттің құрам компоненттері

Келесі суретте пиротехникалық композиттің құрам компоненттері ретінде пайдаланылған калий нитраты, алюминий және синтезделген фуллерен күйесінің микросуреті ұсынылған. Таңдап алынған компоненттер, атап айтқанда калий нитраты матрица рөлін атқарды және наноөлшемді фуллерен құрамды күйе, ағаш көмір мен алюминий толтырғыш рөлін атқарды.

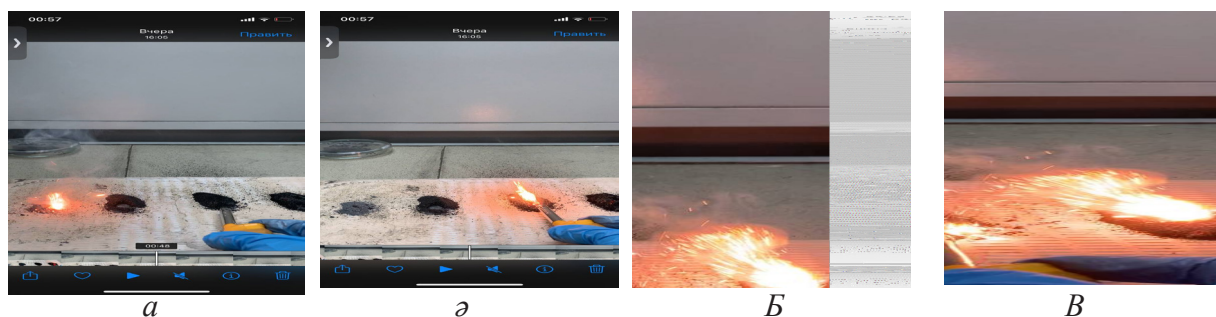


а – калий нитраты, б – алюминий, в – синтезделген фуллерен құрамды күйе

Сурет 6 – Пиротехникалық композиттің құрам компоненттері

Таңдалған компоненттер 1-кестеде көрсетілген массалық қатынас бойынша аналитикалық таразыда өлшеніп алынды. Өлшенген компонент ұнтақтары керамикалық ыдысқа салынып, ступканың көмегімен біркелкі мөлшерге дейін ұнтақталды. Компоненттердің әртүрлі массалық қатынасына ие төрт түрлі құрам дайындалды. Дайындалған құрамдардың жануын қадағалау

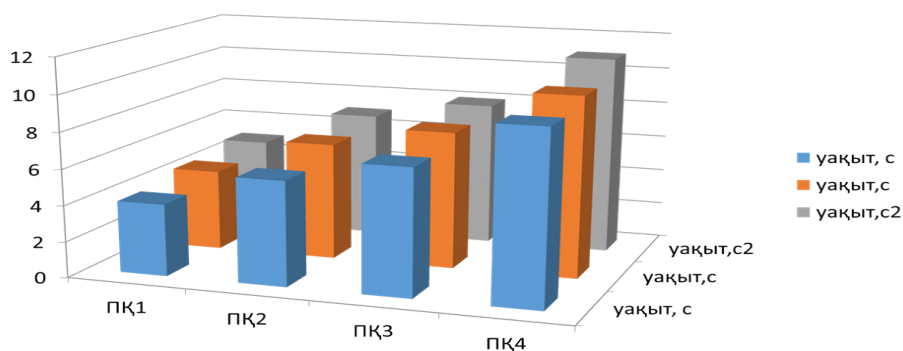
үшін пиротехникалық құрам лабораториясындағы тартқыш шкафтың астына орналастырылды және жағу жұмысы жүргізілді. Жану басталған уақытта секундамер қосылып, құрамның жану уақыты белгіленді. Фуллерен құрамды күйе массасы артқан сайын толықтырылған пиротехникалық құрамның жарықтық эффектісі жоғары екендігі анықталды.



а – ПҚ №1, б – ПҚ №2, Б – ПҚ №3, в – ПҚ №4

Сурет 7 – Пиротехникалық композиттік құрамның жану процесі

Келесі суретте пиротехникалық композиттік құрамдардың жану уақытынан тәуелді диаграммасы ұсынылды. Көріп тұрғанымыздай, фуллерен құрамды күйе мөлшері пиротехникалық композиттік құрамда көбейген сайын, композиттік құрамның жану уақытының артатындығын байқауға болады.



Сурет 8 – Пиротехникалық композиттік құрамдардың жану уақытына тәуелділік диаграммасы

Кесте 1 – Пиротехникалық құрамдардың жану жылдамдығы

	Пиротехникалық құрам	Пиротехникалық құрамның компоненттері, %				Жану уақыты, с.
		Калий нитраты (KNO ₃)	Алюминий	Ағаш көмірі(C)	Фуллерен күйесі	
1	ПҚ № 1	65	10	15	0	5
2	ПҚ № 2	65	10	10	5	7
3	ПҚ № 3	65	10	5	10	8
4	ПҚ № 4	65	10	0	15	11

Кестеден байқағанымыздай, фуллерен құрамды күйе композитте ингибитор рөлін атқаратыны анықталды.

Қорытынды

Электрдоғалық синтез әдісімен алынған көміртекті наноқұрылымдардың C60 және C70 фуллерен күйелері екені анықталды. Синтезделген фуллерен күйе бөлшектерінің морфологиясы кеуекті және кедір-бұдырлы, күйе кеуектерінің өлшемі 32–190 нм аралығында болатыны анықталды.

Тәжірибелердің нәтижесі бойынша синтезделген фуллерен күйелерін пиротехникалық композит құрамның құраушы компоненті ретінде пайдалану мүмкіндігі ұсынылды.

Таңдап алынған компоненттер, атап айтқанда калий нитраты матрица рөлін атқарды және наноөлшемді фуллерен құрамды күйе, ағаш көмір мен алюминий толтырғыш рөлін атқарды. Жұмыстың нәтижесі бойынша пиротехникалық композиттік құрамдардың процесс барысында жарылмайтыны анықталды. Пиротехникалық композиттік құрамдарды сақтау және тасымалдау барысында олардың қауіпсіздік шарттарына сай келетініне көз жеткізілді.

Фуллерен құрамды күйе негізінде пиротехникалық композиттік құрамның жану уақытына тәуелділігі анықталды. Нәтиже бойынша фуллерен құрамды күйе мөлшері пиротехникалық композиттік құрамда көбейген сайын, композиттік құрамның жану уақытының артатыны анықталды.

Бұл мақала ИРН BR21882375 «Жер және ғарыш сегменттерінің беріктігін арттыру және ионосфераны зерттеу арқылы ғарыштық технологиялар өнімдерін жасау және жаңғырту» бағдарламалық мақсатты қаржыландыру аясында жүргізілді.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Baati T., Bourasset F., Gharbi N., Njim L., Abderrabba M., Kerkeni A., Szwarc H. & Moussa F. (2012) The prolongation of the lifespan of rats by repeated oral administration of [60]fullerene. *Biomaterials*, vol. 33, no. 19, pp. 4936–4946.
- 2 Loutfy R.O., Wexler E.M. (2002) Gas-phase hydrogenation of fullerenes. *Perspectives of Fullerene Nanotechnology*, pp. 281–287.
- 3 Fullerene Applications in Biomedicine: A Comprehensive Review – Nanografi –Nanografi Nano Technology. (n.d.). Retrieved January 29, 2024, from <https://nanografi.com/blog/fullerene-applications-in-biomedicine-a-comprehensive-review-nanografi/>
- 4 Nikolay O. (2013) Mchedlov-Petrosyan. Fullerenes in Liquid Media: An Unsettling Intrusion into the Solution Chemistry. *Chemical Reviews*, vol. 113, no. 7, pp. 5149–5193. <https://doi.org/10.1021/cr3005026>.
- 5 Jungah Kim, Chibeom Park, Ji Eun Park, Kwangho Chu and Hee Cheul Choi (2013) Vertical Crystallization of C60 Nanowires by Solvent Vapor Annealing Process. *ACS Nano*, vol. 7, no. 10, pp. 9122–9128. <https://doi.org/10.1021/nn403729g>.
- 6 Lin Wang, Bingbing Liu, Shidan Yu, Mingguang Yao, Dedi Liu, Yuanyuan Hou, Tian Cui and Guangtian Zou, Bertil Sundqvist, Han You, Dingke Zhang and Dongge Ma (2006) Highly Enhanced Luminescence from Single-Crystalline C60·1m-xylene Nanorods. *Chemistry of Materials*, vol. 18, no. 17, pp. 4190–4194. <https://doi.org/10.1021/cm060997q>.
- 7 Zhihao Zeng, Xiangping Li, Haiwei Wang, Changsheng Xie (2023) Optical patterning fullerene nanostructures with high purity and high surface quality. *APL Photonics*, vol. 8, no. 7. <https://doi.org/10.1063/5.0152366>.
- 8 Pan G.P., Yang S. (1997) *Pyrotechnics*. Beijing Institute of Technology Press, Beijing.
- 9 Pan G.P., Yang S. (2005) *Advanced Pyrotechnics*. Beijing Institute of Technology Press, Beijing.

^{1*}**Aimasheva Zh.,**

PhD, student, ORCID ID: 0000-0002-6789-4876, e-mail: zhadyra_aimasheva@mail.ru

^{1,2,3}**Ismailov D.V.,**

Candidate of technical sciences, PhD, ORCID ID: 0000-0002-6384-1478,

e-mail: Ismailov_daniyar_v@bk.ru

⁴**Grishenko V.F.,**

Candidate of physical-mathematic science, docent, ORCID ID: 0000-0003-2244-5599,

e-mail: labreab@mail.ru

⁵**Stefano Bellucci,**

ORCID ID: 0000-0003-0326-6368, e-mail: bellucci@lnf.infn.it

¹**Partizan G.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7001-2654, e-mail: gulmayra.partyzan@kaznu.kz

⁶**Koshtibayev T.B.,**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, ORCID ID: 0009-0004-7344-6801,

e-mail: koshtybayev.t@qyzpu.edu.kz

¹Al-Farabi Kazakh National University, 050040, Almaty, Kazakhstan

²Research Center «KazAlfaTech LTD», 050000, Almaty, Kazakhstan

³Kazakh National Research Technical University K.I. Satbaev, 050000, Almaty, Kazakhstan

⁴LLP «Institute of Ionosphere», 050000, Almaty, Kazakhstan

⁵INFN-Laboratori Nazionali di Frascati, Via E. Fermi 54, 00044 Frascati, Italy

⁶Kazakh National Women's Teacher Training University, Institute of Physics,
Mathematics and Digital Technologies, 050000, Almaty, Kazakhstan

MICRO- AND NANOMICROMATERIALS IN PYROTECHNICS

Abstract

Due to their unique physical and chemical properties, which play an unrivaled role in enhancing the performance and safety of pyrotechnic substances, carbon nanomaterials have garnered significant interest from researchers in recent years. In this paper, carbon nanostructures prepared by electric arc synthesis are identified as C60 and C70 fullerene carbon blacks. The carbon black particles derived from the synthesized fullerenes exhibit a porous and rough morphology, with sizes ranging from 32 to 190 nm. The experimental results indicate the potential use of synthesized fullerene soot as a constituent component of pyrotechnic composites. The dependence of pyrotechnic composite compositions on combustion time has been determined by selecting potassium nitrate, nanoscale fullerenes, composite carbon blacks, wood coals, and aluminum fillers as matrix materials. According to the findings, the combustion time of the composite composition increases as the content of fullerene soot in the pyrotechnic composite composition increases.

Key words: Fullerene, pyrotechnics, composite, gas-phase arc discharge.

^{1*}**Аймашева Ж.,**

PhD студент, ORCID ID: 0000-0002-6789-4876, e-mail: zhadyra_aimasheva@mail.ru.

^{1,2,3}**Исмаилов Д.В.,**

канд. техн. наук, PhD, ORCID ID: 0000-0002-6384-1478,

e-mail: Ismailov_daniyar_v@bk.ru

⁴**Грищенко В.Ф.,**

канд. физ.-мат. наук, доцент, ORCID ID: 0000-0003-2244-5599,

e-mail: labreab@mail.ru

⁵**Stefano Bellucci,**

ORCID ID: 0000-0003-0326-6368, e-mail: bellucci@lnf.infn.it

¹**Партизан Г.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7001-2654, e-mail: gulmayra.partyzan@kaznu.kz

⁶**Коштыбаев Т.Б.,**

канд. физ.-мат. наук, ORCID ID: 0009-0004-7344-6801,

e-mail: koshtybayev.t@qyzpu.edu.kz

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, 050040, г. Алматы, Казахстан

²Исследовательский центр «KazAlfaTech LTD», 050000, г. Алматы, Казахстан;

³Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева, 050000, г. Алматы, Казахстан

⁴ТОО «Институт ионосферы», 050000, г. Алматы, Казахстан

⁵Laboratori Nazionali di Frascati, Via E. Fermi 54, 00044 Frascati, Italy

⁶Казахский национальный женский педагогический университет,
050000, г. Алматы, Казахстан

МИКРО- И НАНОМИКРОМАТЕРИАЛЫ В ПИРОТЕХНИКЕ

Аннотация

В связи с уникальными физическими и химическими свойствами, играющими непревзойденную роль в повышении производительности и безопасности пиротехнических веществ, углеродные наноматериалы в последние годы вызывают интерес исследователей. В этой статье установлено, что углеродные наноструктуры, полученные методом электродугового синтеза, представляют собой сажи из C₆₀ и C₇₀ фуллерена. Установлено, что частицы сажи из синтезированных фуллеренов имеют пористую и шероховатую морфологию и размер сажи составляет от 32 до 190 нм. По результатам экспериментов показана возможность использования синтезированных сажи фуллерена в качестве составляющего компонента пиротехнического композита. Определена зависимость пиротехнических композитных составов от времени горения, выбирая в качестве матрицы нитрат калия, наноразмерные фуллерены, составные сажи, деревянные угли и алюминиевые наполнители. По результатам увеличивается время горения композитного состава по мере увеличения содержания фуллереновой сажи в пиротехническом композитном составе.

Ключевые слова: фуллерен, пиротехника, композит, дуговой разряд в газовой фазе.