

ӘОЖ 537.523.527.662.111.1
FTAMP 29.19.22

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-313-323>

- ^{1,2}**Накысбеков Ж.Т.,**
PhD, ORCID ID: 0000-0002-3419-6908,
e-mail: jhasulan@gmail.com
- ^{1,2}**Жумадилов Б.Е.,**
магистр, ORCID ID: 0000-0001-5784-3840,
e-mail: zhumadilovbe@gmail.com
- ^{1,2*}**Партизан Г.,**
PhD, ORCID ID: 0000-0002-1989-8282,
e-mail: gulmira.partizan@gmail.com
- ^{1,2}**Исмаилов Д.В.,**
PhD, ORCID ID: 0000-0002-6384-1478,
e-mail: ismailov_daniyar_v@bk.ru
- ¹**Грищенко В.Ф.,**
физ.-мат.ф.к., ORCID ID: 0000-0003-2244-5599,
e-mail: labreab@mail.ru
- ²**Суюндыкова Г.С.,**
магистр, ORCID ID: 0000-0002-5221-4233,
e-mail: gulnura_87_05@mail.ru
- ²**Медянова Б.С.,**
магистр, ORCID ID: 0000-0002-9160-4357,
e-mail: medyanova.b@spaceres.kz
- ³**Алиев Б.А.,**
физ.-мат.ф.д., ORCID ID: 0000-0003-2448-8074,
e-mail: aliyevb72@gmail.com
- ⁴**Мерейхан Л.,**
магистр, ORCID ID: 0009-0001-6744-6563,
e-mail: Lazka_89_89@mail.ru

- ¹«Ионосфера институты» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан
- ²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті,
Алматы қ., Қазақстан
- ³Алматы технологиялық университеті,
Алматы қ., Қазақстан
- ⁴Қ. Құлажанов атындағы ҚазТБУ,
Астана қ., Қазақстан

ҒАРЫШ ТЕХНОЛОГИЯСЫНДА ҚОЛДАНУҒА АРНАЛҒАН ГРАФЕН НАНОҚҰРЫЛЫМДАРЫНЫҢ СИНТЕЗІ ЖӘНЕ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Аңдатпа

Бұл мақалада ғарыштық техникаларда қолдануға арналған графен нанокұрылымдарының синтезі және олардың трибологиялық қасиеттері талқыланады. Мақалада газдық фазадан химиялық тұндыру (CVD) әдісімен графен синтезі бойынша жүргізілген эксперименттердің нәтижелері ұсынылған. Жоғары сапалы графен алу үшін оңтайлы технологиялық параметрлерді анықтау мақсатында жүргізілген тәжірибелер сериясының нәтижесінде температура (1000°C) және газ қатынасы (0,5/200 см³/мин) сияқты синтездің

оңтайлы параметрлері анықталды. Сондай-ақ, синтезделген нанокұрылымдардың жоғары сапасын және олардың біртекті таралғандығын растайтын сканерлеуші электронды микроскопия (SEM) әдісімен алынған нәтижелер ұсынылған. Нанокұрылымның сапасын бағалау мақсатында жүргізілген Раманов спектроскопиясының нәтижесі бойынша синтезделген нанокұрылымның графен екендігі және I2D/IG қатынасы 1,89-ға тең екендігі анықталды. Талдауларға сәйкес синтезделген графендер бір қабатты екендігі көрсетілді. Трибологиялық тәжірибелер нәтижесі бойынша графен жабыны кәдімгі болатпен салыстырғанда үйкеліс коэффициентін айтарлықтай төмендететіні анықталды. Алынған нәтижелерді талдай отырып, майлау материалдарын қолданған жағдайда да, құрғақ үйкеліс жағдайында да графен жабынының үйкелісті азайтудағы тиімділігі көрсетілді. Бұл трибологиялық жүйелердің жұмысын жақсартуға және қызмет ету мерзімін ұзартуға пайдалы. Әрі қарайғы зерттеулердің міндеті – синтез әдістерін жетілдіру және ғарыш жағдайында графен нанокұрылымдарының тұрақтылығын бағалау.

Тірек сөздер: графен, көміртекті нанокұрылымдар, ғарышқа арналған материалдар, газ фазасынан термиялық-химиялық тұндыру.

Кіріспе

Ғарыштық техника шектен тыс жоғары және төмен температуралар, радиация және атмосфераның болмауы сияқты бірегей қиындықтарға тап болып жатады. Мұндай жағдайлар ғарыш аппараттарының сенімділігі мен ұзақ мерзімділігін қамтамасыз ете алатын жаңа материалдарды әзірлеуді талап етеді. Осы тұрғыда графендік нанокұрылымдар өздерінің бірегей қасиеттерінің арқасында ғарыш техникасында қолдануға аса перспективалы материалдардың бірі болып саналады. Оларды пайдалану ғарыш аппараттарының сипаттамаларын айтарлықтай жақсартуы мүмкін, соның ішінде: беріктік, жеңілдік, коррозия мен үйкеліске төзімділік.

Шынында да, графен болаттан 200 есе мықты және 100 есе берік. Оның үстіне, қазіргі таңда әлемдегі ең жақсы электр және жылу өткізгіш, сондай-ақ иілгіш, мөлдірлікке ие, тұрақты және су өткізбейтін және вакуумдағы кез келген материалдың ең жоғары балку температурасына ие.

Шын мәнінде, графен болаттан 200 есе мықты және 100 есе берік. Сонымен қатар, ол ең жақсы электр және жылу өткізгіш, сондай-ақ иілгіш, мөлдір, тұрақты, өткізбеуші, және вакуум жағдайындағы балку температурасы ең жоғары материал болып табылады. Бұл қасиеттері графен негізіндегі материалдардың қазіргі таңда атқарылып жатқан және болашақ ғарыш миссияларының талаптарына толық сәйкес келетінін дәлелдейді. Себебі мұндай миссияларға шамадан тыс қызуға, радиацияға және соққыға төтеп бере алатын, сонымен қатар функционалдық тұтастығын жоғалтпайтын материалдар қажет [1].

Ғарыш миссияларының компоненттері мен құрылымдарында қолданылатын материалдар бастапқы жер үсті сынақтары мен біліктілік рәсімдері кезінде жоғары кернеулерге ұшырайды. Ұшу мен ұшыру кезеңдерінде бұл материалдар қатты дірілдерге, соққы толқындарына, ауырлық күштерінің өзгерістеріне және жоғары температуралық градиенттерге тап болады. Орбитада материалдарға ғарыш вакуумы, ғарыштық радиация, күн желі, атомарлық оттегі, плазмалық зарядталу, микрометеориттер мен ғарыштық қоқыс кері әсер етеді. Жер маңындағы орбитада орналасқан ғарыш кемесінің материалдары -180°C -тан $+180^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі температураға, басқа планеталарға жақын орналасқандары -200°C -қа дейінгі, ал күнге жақын орналасқандары 520°C -тан жоғары температураға ұшырайды.

Осындай қолайсыз факторлардың әсерінен көптеген дәстүрлі материалдар өздерінің құрылымдық және функционалдық қасиеттерінің бұзылуына ұшырайды. Осы орайда, жаңа, озық және болашағы зор жасанды материал – графен ерекше маңызға ие. Графен ашылған сәттен бастап ол ғарыш саласындағы көптеген мәселелерді шешуге үлкен мүмкіндік беретінін көрсетті [2].

Жұлдызаралық шаң мен планеталық атмосфераны астрономиялық бақылаулар, сондай-ақ комета, астероид және метеорит құрамдас бөліктерін талдау бұл жасанды жоғары тех-

нологиялық материалдың табиғи түрде пайда болатын нанокұрылым [2] екенін, жұлдызаралық көміртегінің жалпы көлемінің $\sim 1,9\%$ құрайтынын көрсетті [3,4].

Новоселов және т.б. зерттеулері [5] 2D графен жұптары жоғары қаттылықпен (1 ТПа), жоғары созылу беріктігімен (130 ГПа) және жоғары электрлік ($350\,000\text{ см}^2/\text{В с}$) және жылу өткізгіштікпен ($5,3\text{ кВт/м К}$) өте төмен массалық тығыздықты қамтитынын атап өтті. Өкінішке орай, мұндай керемет қасиеттер тек жоғары сапалы бір қабатты графенмен ғана көрсетіледі, бұл таңғажайып материал осы уақытқа дейін күрделі әдістерді қолдана отырып, аз мөлшерде өндірілуі мүмкін [6].

Осы тамаша қасиеттерді толық пайдаланудың міндетті шарты жоғары сапалы графенді өндіру болып табылады. Графенді микромеханикалық қабыршақтау [7], газдық фазадан химиялық тұндыру (CVD) [8–11], тотығу-тотықсыздану процесі [12], солвотермиялық әдіс [13] және т.б. жолдармен алуға болатыны белгілі. Бұл синтездеу әдістерінің ішінде жоғары сапалы, біркелкі, үлкен пленкалы қабықшаларды ауқымды өндіруге қойылатын талаптарды тек CVD әдісі қанағаттандыра алады.

CVD әдісінде графен жоғары температурада метан, этилен, ацетилен және бензол сияқты әртүрлі көмірсутекті газдардың әсерінен көміртекпен қанықтыру арқылы әртүрлі өтпелі металл субстраттарында, мысалы, Ni, Cu және т.б. тікелей синтезделеді. Осы металдардың ішінде мыс фольгасының жоғары балқу температурасы, төмен көміртегі атомын сіңіру жылдамдығы, төмен баға және қайта өңдеу сияқты айқын артықшылықтары бар. Дегенмен, графеннің өсуіне мыс фольгасының беткі жағдайы үлкен әсер ететіні белгілі. Жоғары сапалы графен пленкаларын өсіру үшін графенді алу алдында олардың бетінің күйін оңтайландыру үшін мыс фольгасының субстраттарына көптеген алдын ала өңдеу әдістері қолданылды [8–11].

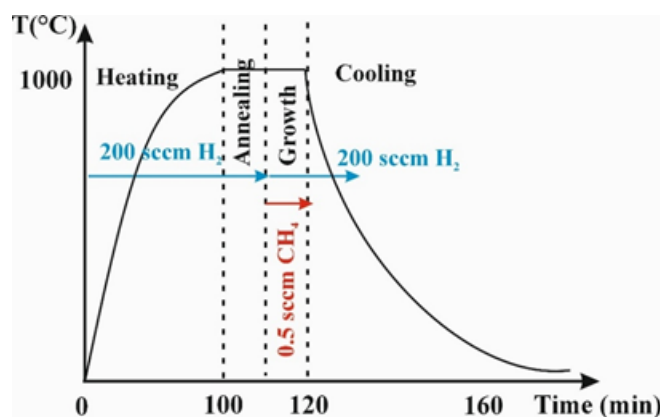
Бұл жұмыста графендік нанокұрылымдарды газ фазасынан термиялық-химиялық тұндыру әдісімен синтездеу бойынша жүргізілген эксперименттердің нәтижелері ұсынылған.

Материалдар мен әдістер

Графен нанокұрылымдарының синтезі көлденең үш аймақты құбырлы пештің көлемінде жүргізілді. Графен нанокұрылымдарын синтездеуге арналған қондырғының схемасы 1-суретте көрсетілген.

Ғарыш кеңістігінде пайдалану үшін графен нанокұрылымдарын синтездеу әдістемесін жасау үшін әртүрлі эксперименттік параметрлері бар бірнеше эксперименттер сериясы жүргізілді. Графеннің өсуіне субстрат-катализатор ретінде қалыңдығы 200 мкм, ауданы 1 см^2 және тазалығы 99,99% мыс фольга пайдаланылды. Буферлік газ ретінде сутегі, ал көміртегі көзі ретінде метан пайдаланылды. Тәжірибелер сериясының нәтижелері бойынша жоғары сапалы графенді синтездеу үшін оңтайлы температура белгіленді. Оңтайлы синтез температурасы $1000\text{ }^\circ\text{C}$ болды. Тәжірибелердің ұзақтығы 10 минут. Газ қатынасының оңтайлы мәнін анықтау үшін әртүрлі параметрлері бар тәжірибелер де жүргізілді. Газ қатынасының оңтайлы мәні $0,5/200\text{ см}^3/\text{мин}$ болды [12].

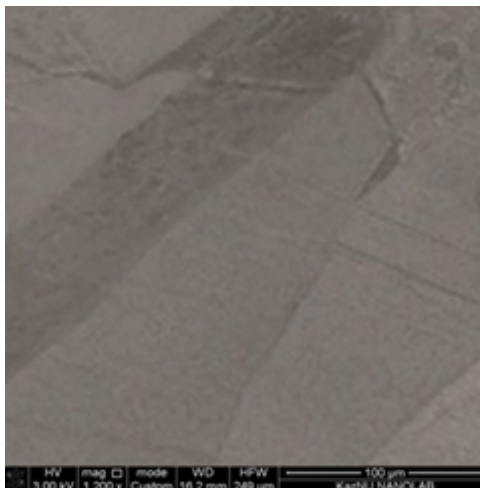
Мыс фольга үлгісін керамикалық қайыққа салып, реакторға орнатқаннан кейін реактор камерасы 10^{-2} Торр қысымға дейін сорылып алынды, содан кейін пешті қыздыру процесі басталды, қыздыру жылдамдығы $100\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$, қыздыру H_2 ағынында жүргізілді. Синтез температурасына жеткенде жүйе тұрақтандырылды және үлгі мыстың орташа түйіршікті мөлшерін арттыру мақсатында H_2 ағынының жылдамдығын өзгертпей $t=10$ мин жұмсартылды. Осыдан кейін реактор камерасына $0,5\text{ ссст}$ ағын жылдамдығымен метан жіберілді. Синтездеу уақытынан кейін пеш H_2 200 ссст ағынында табиғи түрде салқындатылды. Кейін үлгі түтіктің салқын бөлігіне ауыстырылып, содан кейін шығарылды. Синтез процесінің жалпы схемасы 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1 – Графен нанокұрылымдарын синтездеу процесі

Нәтижелер мен талқылау

Алынған үлгілер сканерленген электрондық микроскопия (SEM) арқылы зерттелді. Үлгілерді зерттеу Quanta 3D 200i микроскопының көмегімен Ашық үлгідегі ұлттық нанотехнологиялар зертханасында жүргізілді.

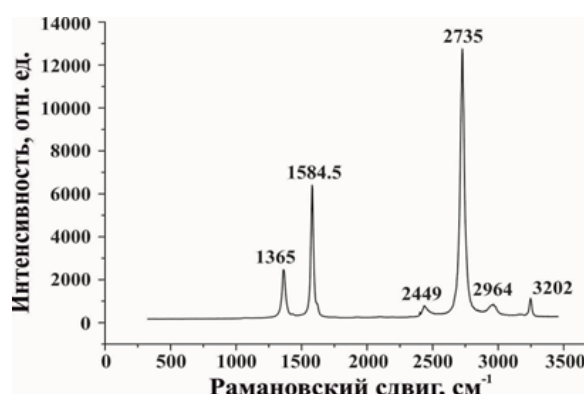


Сурет 2 – Қалыңдығы $d=200$ мкм болатын мыс фольгасында синтезден нанокұрылымның SEM бейнесі

Төменде 1000°C температурада, газ қоспасының қатынасы (CH_4/H_2) $0,5/200$ $\text{cm}^3/\text{мин}$ және әртүрлі қалыңдықтағы мыс фольгаларымен жүргізілген тәжірибенің нәтижесі берілген.

SEM кескіндерін талдау арқылы 200 қалыңдықтағы мыс фольгаларында алынған субстраттардың бетінде біртекті таралған пленкаларды байқауға болады. Сонымен қатар, SEM кескіндерінен беттік қабатта қараңғы және ашық аймақтардың кездесетінін байқауға болады, бұл пленка қабаттарының бар екенін және олардың қабаттық құрылымын көрсетеді.

Графен нанокұрылымдарының сапасы, сондай-ақ қабаттар саны NTEGRA Spectra қондырғысында алынған Раман спектрлерін талдау негізінде бағаланды. Сызықтар толқын ұзындығы 473 нм болатын көк лазермен қоздырылды. 3-суретте графен нанокұрылымының Раман спектрлері көрсетілген.



Сурет 3 – Графендік наноқұрылымның ЖКШ спектрі

Суреттен спектрде көміртекке тән негізгі D және G шыңдары тиісінше 1365 және 1584,5 см^{-1} аймағының байқалатыны көрінеді. Спектрдің жоғары жиілікті аймағында екінші ретті D', 2D және D + G шыңдары байқалады, олар сәйкесінше 2449, 2735 және 2964 см^{-1} аралығында орналасқан. Бұл шыңдардың болуы графеннің бар екенін көрсетеді. 2D және G шыңдарының интенсивтіліктерінің қатынасы (I_{2D}/I_G) мен 2D шыңының жартылай максимум деңгейіндегі толық ендігі (FWHM) графен сапасын бағалаудың маңызды параметрлері болып табылады [13, 14]. Сондай-ақ, I_{2D}/I_G қатынасы бойынша графен қабаттарының санын анықтауға болады. Әдетте, I_{2D}/I_G қатынасы моноқабатты графен үшін 2–3, екі қабатты графен үшін $2 > I_{2D}/I_G > 1$, ал көпқабатты графен үшін $I_{2D}/I_G < 1$ мәндерінде болады [15, 16]. Раман спектрлерін талдай отырып, қалыңдығы 200 мкм болатын мыс фольгада алынған графен пленкалары ең аз ақауларға ие екенін көруге болады. Осыған сәйкес I_{2D}/I_G қатынасы 1,89 құрады, бұл бір қабатты графенге тән жоғары көрсеткіш болып табылады. Сонымен қатар, 2D шыңының пішіні симметриялы және толық ені жартылай максимум деңгейінде (FWHM) шамамен 30–35 см^{-1} аралығында, бұл да бір қабатты графеннің тағы бір дәлелі ретінде қарастырылады. Жалпы алғанда, алынған Раман спектрі жоғары сапалы, бір қабатты графен құрылымының түзілгенін көрсетеді.

Трибологиялық зерттеулер

Алынған үлгілердің үйкеліс жағдайында тозуын сынауды жүргізу үшін үлгіні бөлек дайындау қажет болады. Трибологиялық қасиеттерді зерттеу мақсатында графеннің өте жұқа қабаттарын басқа материалдар мен негіздер бетіне көшіру ылғалды өңдеу ерітінді әдісі арқылы іске асырылады. Графен синтездеу үшін мыс фольгасының бетін бірнеше сағат бойы ерітінді ішінде ұстады. Мысты жартылай өңдеу процесінен кейін қалған бөлік пинцетпен алынып, ал графеннің жұқа мөлдір қабатын өңдеу үшін ертінді бетінде бірнеше сағат ұстап, мыс қалдықтарынан тазартылды. Өңдеу ерітіндісі ретінде 3 г/мл, FeCl_3 сулы ерітіндісі қолданылды. Содан кейін осы қабаттар қалыңдығы 2 мм және диаметрі 58 мм болатын болат материалдың бетіне отырғызылды.

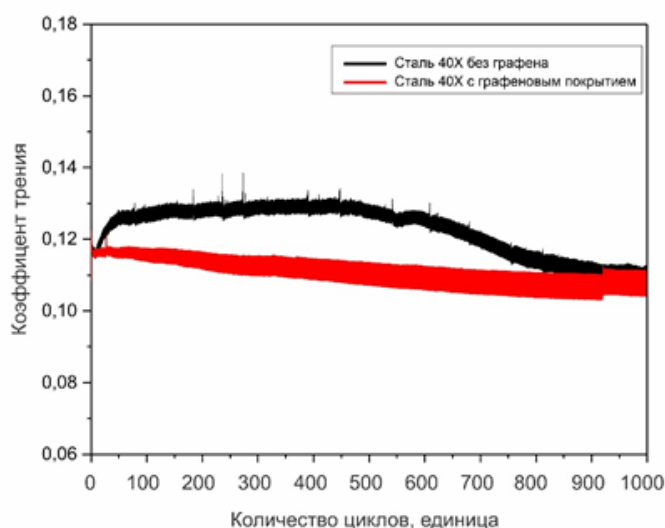
Үлгілердің трибологиялық сипаттамалары «дисктегі шар» схемасы бойынша, бөлме температурасында, майлаусыз (құрғақ үйкеліс) және майлаумен сынақтан өткізілді.

Құрғақ үйкеліс жағдайында трибологиялық сипаттамалары

Сынақтың шарттары келесідей болды: үлгінің қарсы денеге қатысты қозғалу жылдамдығы – 1 см/с, жүктеме – 100 мН, үйкеліс жолының радиусы – 16 мм, үйкеліс жолының ұзындығы – 1000 цикл. Қарсы дене ретінде 3 мм диаметрі бар 100Cr6 маркалы болат шар қолданылды. Сынақ шарттары халықаралық ASTM G99-959 стандарттарына сәйкес келді. 5-суретте 40X болатының және графенмен қапталған болаттың құрғақ үйкеліс жағдайындағы үйкеліс коэффициентінің (ҮК) өзгеру графигі ұсынылған. Алынған деректерді талдай отырып, графендік жабынды қолдану болаттың үйкеліс коэффициентін төмендететіні туралы қорытынды жасауға болады. Графенсіз 40X болатында сынақтың алғашқы кезеңдерінде 100

циклға дейін ҮК артады, бұл беттің қаттылығына байланысты болуы мүмкін. Кейіннен ҮК арта түсіп, 500–600 циклдан кейін 0.15–0.16 диапазонында шындық мәндерге жетеді, бұл өз кезегінде үйкелістің прогрессивті тозуы мен ауданының ұлғаюымен байланысты болуы мүмкін. 600 циклдан кейін ҮК төмендеуі байқалады, бұл шаршау тозуымен және бет күйінің тұрақтануымен түсіндіріледі. Ал графендік жабынмен 40Х болатында ҮК мәндері сынақтың барлық уақытында айтарлықтай тұрақты болады және 0.11–0.12 диапазонында сақталады. Бұл эффект графеннің майлау қасиеттерімен түсіндіріледі. Графеннің екі өлшемді қабатты құрылымы оның қабаттарының бір-біріне қатысты оңай сырғуына ықпал етеді, бұл үйкелісті және беттің тозуын азайтады.

[17] зерттеулер графенді жабындардың ҮК әдетте 0.05–0.15 арасында өзгеретінін көрсетті, бұл деректер зерттеу нәтижелеріне сәйкес келеді және графеннің ұзақ циклдерде де төмен үйкеліс деңгейін сақтайтынын көрсетеді. Сынақтың барлық уақытында графеннің тұрақты көрсеткіштері оның жоғары тозуға төзімділігін растайды. Бұл басқа зерттеулердің нәтижелерімен [18] сәйкес келеді, онда графен бірнеше рет салынған жүктемелердің әсерінен бетке зақым келтірмеуді және адгезияны болдырмауды қамтамасыз етті. Berman et al. [17] зерттеулері графенді жабындар құрғақ үйкеліс жағдайында ҮК -нің 0.01–0.03 аралығына дейін төмендететінін көрсеткен, бұл графиктегі деректермен сәйкес келеді. Графен үйкелісті айтарлықтай төмендетеді және беттің зақымдануын минимизациялайды, бұл жоғары жүктемелер мен ұзақ циклдар жағдайында әсіресе маңызды.



Сурет 4 – Құрғақ үйкеліс жағдайында 40Х болатының және графенмен қапталған болаттың үйкеліс коэффициенті

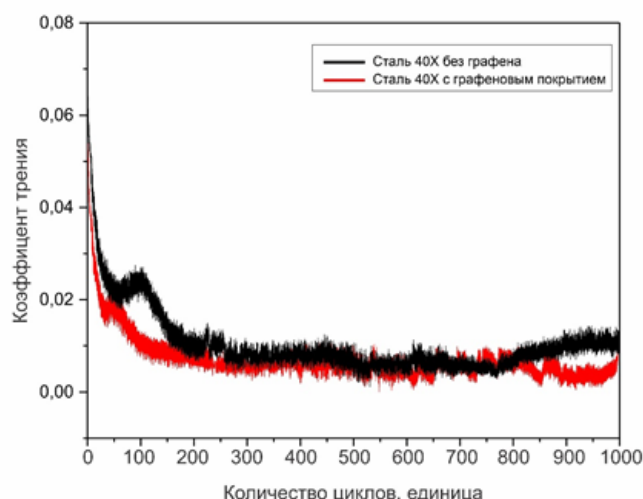
Майлаудың үйкеліс жағдайындағы трибологиялық сипаттамалары

Сынақтың шарттары құрғақ үйкеліс жағдайымен бірдей болды. Майлау ретінде ТМ-5-18 API GL-5 маркалы трансмиссионды май қолданылды. 5-суретте 40Х болатының майлау жағдайындағы және графенмен қапталған болаттың ҮК өзгеруі көрсетілген. Майлаудың әсерін қарастырсақ, нәтижелер әртүрлі болуы мүмкін, себебі майлағыш материал әдетте жанасушы беттерді бөлетін қабат қалыптастырады және ҮК дәстүрлі майлар үшін 0.01–0.02 мәндеріне дейін төмендетеді [19].

Графенмен қапталмаған болат үшін майлау жағдайында ҮК құрғақ үйкеліс нәтижелеріне карағанда төмендеуі мүмкін. Алайда, ұзақ үйкеліс кезінде майлау материалдары қышқылдану, тозу өнімдерінің ластануы немесе жергілікті артық қыздыру салдарынан тиімділігін жоғалтуы мүмкін [20].

Графенмен қапталаған болаттың, тіпті майлау қолданылған жағдайда да, үйкелісті одан әрі төмендету күтіледі, себебі графен қосымша майлау қабаты ретінде әрекет ете алады, бұл майлағыш материалдың бетке адгезиясын жақсартады [17].

Song et al [19] графен негізіндегі наноматериалдардан жасалған майлағыштарды қолдану, әсіресе жоғары температуралар мен қысым жағдайында ҮК 0.005–0.015 мәндеріне дейін қосымша төмендетуі мүмкін екенін атап өтті. Графенмен қапталмаған болат үшін 600 циклдан кейін ҮК -нің айтарлықтай өсуі байқалады, бұл прогрессивті тозумен байланысты. Бұл әсіресе жоғары жүктемелер жағдайында, үйкеліс кезінде бөлшектердің жұмыс сипаттамаларының төмендеуіне әкелуі мүмкін.



Сурет 5 – Майлау үйкеліс жағдайындағы 40X болатының және графенмен қапталаған болаттың үйкеліс коэффициенті

Графенмен қапталған болат жоғары тозуға төзімділігін көрсетіп, 1000 циклдан кейін де тұрақты ҮК мәндерін сақтайды, бұл материалдардың әсіресе трибологиялық жүйелерде қызмет ету мерзімін ұзартуға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Графенді нанокұрылымдарды ғарыш кеңістігінде қолдану үшін синтез әдісін әзірлеу мақсатында түрлі эксперименттік параметрлермен бірнеше сериялы эксперименттер жүргізілді.

Жүргізілген эксперименттер нәтижелері бойынша жоғары сапалы графен синтезі үшін оңтайлы температура анықталды және 1000°C болып табылады. Газдар арақатынасын анықтау үшін де түрлі параметрлермен тәжірибелер жүргізілді. Оңтайлы газдар арақатынасы $0,5/200 \text{ см}^3/\text{мин}$ болып шықты.

СЭМ зерттеулерінің нәтижелері көрсеткендей, 200 мкм қалыңдықта мыс фольгасына синтезделген үлгілердің беті толық жабылған пленкалар екендігі байқалды.

Раман спектроскопиясының нәтижесі бойынша синтезделген нанокұрылымның графен екендігі және I_{2D}/I_G қатынасы 1,89 тең екендігі анықталды. Талдауларға сәйкес синтезделген графендер бір қабатты екенін көрсетті.

Трибологиялық тәжірибелер нәтижесі бойынша, графен жабыны 40X болатының үйкеліс коэффициентін сынақтың бастапқы кезеңінде 0,07-ден 0,04-ке дейін төмендететінін және 100 циклден кейін 0,015–0,02 деңгейінде тұрақтанатынын көрсетеді. Графен жабынсыз болаттың үйкеліс коэффициенті 0,06–0,07 аралығынан 0,025–0,035 дейін төмендейді, бірақ ол үлкен тербелістерді көрсетеді және 600 циклден кейін артады.

Майлау материалдарын қосқанда, үйкеліс коэффициенті өңделмеген болат үшін қосымша түрде 0,01–0,02 дейін төмендеуі мүмкін, ал Графенмен қапталмаған болат үшін 0,005–0,015 дейін. Бұл нәтижелер Майлау материалдарын қолданған жағдайда да, құрғақ үйкеліс жағдайында да графен жабынының үйкелісті азайтудағы тиімділігін көрсетеді. Бұл трибологиялық жүйелердің жұмысын жақсартуға және қызмет ету мерзімін ұзарту үшін пайдалы.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржылай қолдауымен жүзеге асырылды (ИРН BR21882375 «Жер және ғарыш сегменттерінің жоғары сенімділікті ғарыштық технологиялар өнімдерін жасау мен жаңғырту және ионосфераны зерттеу»).

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Ghidini, T. Materials for Space Exploration and Settlement. *Nat. Mater.*, 17, 846–850 (2018).
- 2 Chaitanya Giri, T., Steele, A., Fries, M. Evidence for protosolar graphene in Allende and QUE 94366 CV3 meteorites. *Planet. Space Sci.* 2021, 203.
- 3 Merino, P., Svec, M., Martinez, J.I., Jelinek, P., Lacovig, P., Dalmiglio, M., Lizzit, S., Soukiassian, P., Cernicharo, J., Martin-Gago, J.A. Graphene etching on SiC grains as a path to interstellar polycyclic aromatic hydrocarbons formation. *Nat. Commun.*, 5, 3054 (2014).
- 4 Chen, X.H., Li, A., Zhang, K. On graphene in the interstellar medium. *Astrophys. J.*, 850, 104 (2017).
- 5 Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V., Grigorieva, I.V., Firsov, A.A. Discover of graphene: Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306, 666–669 (2004).
- 6 Bhuyan, M.S.A., Uddin, M.N., Islam, M.M., Bipasha, F.A., Hossain, S.S. Synthesis of graphene. *Int. Nano Lett.*, 6, 65–83 (2016).
- 7 Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D.A., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I.V., Firsov, A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306, 666–669 (2004).
- 8 Yu, Q., Lian, J., Siriponglert, S., Li, H., Chen, Y.P., Pei, S.-S., Siriponglert, S. Graphene segregated on Ni surfaces and transferred to insulators. *Appl. Phys. Lett.*, 93, 113103 (2020).
- 9 Reina, A., Jia, X., Ho, J., Nezich, D., Son, H., Bulovic, V., Dresselhaus, M. S., Kong, J. Large Area, Few-Layer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor Deposition. *Nano Lett.*, 9, 3087 (2018).
- 10 Kim, K.S., Zhao, Y., Jang, H., Lee, S.Y., Kim, J.M., Kim, K.S., Ahn, J.-H., Kim, P., Choi, J.-Y., Hong, B.H. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. *Nature*, 457, 706–710 (2009).
- 11 Li, X., Cai, W., An, J., Kim, S., Nah, J., Yang, D., Piner, R., Velamakanni, A., Jung, I., Tutuc, E., et al. Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils. *Science*, 324, 1312–1314 (2009).
- 12 Partizan G. et al 2016 *Mater. Res. Express* 3 115010.
- 13 Ferrari, A.C., Meyer, J.C., Scardaci, V., Casiraghi, C., Lazzeri, M., Mauri, F., Piscanec, S., Jiang, D., Novoselov, K.S., Roth, S., Geim, A.K. Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers. *Phys. Rev. Lett.*, 97, 187401 (2006).
- 14 Saito, R., Hofmann, M., Dresselhaus, G., Jorio, A., Dresselhaus, M.S. Raman spectroscopy of graphene and carbon nanotubes. <http://www.tandfonline.com/loi/tadp20>.
- 15 Nguyen, V.T., Le, H.D., Nguyen, V.C., Ngo, T.T.T., Le, D.Q., Nguyen, X.N. and Phan, N.M. Synthesis of multi-layer graphene films on copper tape by atmospheric pressure chemical vapor deposition method. *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.*, 4, 035012 (5pp) (2013).
- 16 Ren, Y., Zhu, C., et. al. An improved method for transferring grapheme grown by chemical vapor deposition. *Brief Reports and Reviews.*, 7 (1), 1150001 (6 pp) (2012).
- 17 Berman, D., Erdemir, A., Sumant, A.V. Graphene: A new emerging lubricant. *Materials Today*, 18 (5), 253–264 (2015).

18 Li, H., Xu, T., Zhang, Z. Wear resistance and frictional properties of graphene-based coatings under different conditions. *Wear*, 452, 203–211 (2020).

19 Song, H., Wang, X., Zhou, F. Solid lubricants: Recent developments and applications. *Tribology International*, 129, 333–344 (2018).

20 Fang, L., Cui, Z., Wang, W. Lubrication performance of graphene as a lubricant additive. *Wear*, 384, 119–123 (2017).

^{1,2}**Накысбеков Ж.Т.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-3419-6908,

e-mail: jhasulan@gmail.com

^{1,2}**Жумадилов Б.Е.,**

магистр, ORCID ID: 0000-0001-5784-3840,

e-mail: zhumadilovbe@gmail.com

^{1,2*}**Партизан Г.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-1989-8282,

*e-mail: gulmira.partizan@gmail.com

^{1,2}**Исмаилов Д.В.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-6384-1478,

e-mail: ismailov_daniyar_v@bk.ru

¹**Грищенко В.Ф.,**

к.ф.-м.н., ORCID ID: 0000-0003-2244-5599,

e-mail: labreab@mail.ru

²**Суюндыкова Г.С.,**

магистр, ORCID ID: 0000-0002-5221-4233,

e-mail: gulnura_87_05@mail.ru

²**Медянова Б.С.,**

магистр, ORCID ID: 0000-0002-9160-4357,

e-mail: medyanova.b@spacere.kz

³**Алиев Б.А.,**

д.ф.-м.н., ORCID ID: 0000-0003-2448-8074,

e-mail: aliyevb72@gmail.com

⁴**Мерейхан Л.,**

магистр, ORCID ID: 0009-0001-6744-6563,

e-mail: Lazka_89_89@mail.ru

¹ТОО «Институт ионосферы», г. Алматы, Казахстан

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

³Алматинский технологический университет, г. Алматы, Казахстан

⁴КазУТБ им. К. Кулажанова, г. Астана, Казахстан

СИНТЕЗ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАФЕНОВЫХ НАНОСТРУКТУР ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Аннотация

В этой статье рассматривается синтез графеновых наноструктур и их трибологические свойства для применения в космических технологиях. Приведены результаты экспериментов по синтезу графена методом химического осаждения из газовой фазы (CVD). В результате серии экспериментов, проведенных с целью получения оптимальных технологических параметров для получения высококачественного графена, определены оптимальные параметры синтеза, такие как температура (1000 °C) и соотношение газов (0,5/200 см³/мин). Также представлены результаты, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (SEM), подтверждающие высокое качество синтезированных наноструктур и их однородное распределение. По результатам рамановской спектроскопии, проведенной с целью оценки качества наноструктур, установ-

лено, что синтезированные наноструктуры являются графеном и соотношение I2D/IG равно 1,89. Анализ показал, что полученные графены имеют однослойную структуру. Трибологические эксперименты показали, что графеновое покрытие существенно снижает коэффициент трения по сравнению с обычной сталью. Полученные результаты подтвердили высокую эффективность графенового покрытия как при использовании смазочных материалов, так и в условиях сухого трения. Это открывает возможности для повышения эффективности работы трибологических систем и продления их срока службы. Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование методов синтеза и оценку прочностных характеристик графеновых наноструктур в условиях космической эксплуатации.

Ключевые слова: графен, углеродные наноструктуры, космические материалы, термическое химическое осаждение из газовой фазы.

^{1,2}**Nakysbekov ZH.T.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-3419-6908,

e-mail: jhasulan@gmail.com

^{1,2}**Zhumadilov B.E.,**

Master's degree, ORCID ID: 0000-0001-5784-3840,

e-mail: zhumadilovbe@gmail.com

^{1,2*}**Partizan G.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-1989-8282,

*e-mail: gulmira.partizan@gmail.com

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

PhD ORCID ID: 0000-0002-6384-1478,

e-mail: ismailov_daniyar_v@bk.ru

¹**Grishchenko V.F.,**

Cand.Phys.-Math.Sc., ORCID ID: 0000-0003-2244-5599,

e-mail: labreab@mail.ru

²**Suyundykova G.S.,**

Master's degree, ORCID ID: 0000-0002-5221-4233,

e-mail: gulnura_87_05@mail.ru

²**Medyanova B.S.,**

Master's degree, ORCID ID: 0000-0002-9160-4357,

e-mail: medyanova.b@spacere.kz

³**Aliyev B.A.**

Dr.Phys.-Math.Sc., ORCID ID: 0000-0003-2448-8074,

e-mail: aliyevb72@gmail.com

⁴**Meirkhan L.,**

Master's degree, ORCID ID: 0009-0001-6744-6563,

e-mail: Lazka_89_89@mail.ru

¹Institute of Ionosphere LLP, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

³Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

⁴K. Kulazhanov KazUTB, Astana, Kazakhstan

SYNTHESIS AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF GRAPHENE NANOSTRUCTURES FOR USE IN SPACE TECHNOLOGY

Abstract

The synthesis of graphene nanostructures and their tribological properties for applications in space technologies are discussed in this article. The results of experiments on graphene synthesis using the chemical vapor deposition (CVD) method are presented. A series of experiments aimed at determining the optimal technological

parameters for obtaining high-quality graphene identified the optimal synthesis conditions: temperature (1000 °C) and gas ratio (0.5/200 cm³/min). The scanning electron microscopy (SEM) results confirm the high quality of the synthesized nanostructures and their uniform distribution. Raman spectroscopy, performed to assess the quality of the nanostructures, established that the synthesized nanostructures are graphene with an I₂D/IG ratio of 1.89. The analysis showed that the obtained graphene has a monolayer structure. Tribological experiments demonstrated that the graphene coating significantly reduces the coefficient of friction compared to conventional steel. The obtained results confirmed the high efficiency of the graphene coating both when using lubricants and under dry friction conditions. This opens up opportunities for improving the performance of tribological systems and extending their service life. Further research will focus on improving synthesis methods and evaluating the strength characteristics of graphene nanostructures under space operation conditions.

Keywords: graphene, carbon nanostructures, space materials, thermal chemical vapor deposition.

Мақаланың редакцияға түскен күні: 13.08.2025