

М. Әліпұлы^{1*}, Қ. Асқарұлы¹, Қ. Тоштай², Н.Н. Нұрғалиев³, С. Азат¹

¹Satbayev Univeristy,

050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сатпаев к-сі, 22

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,

050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Әл-Фараби даңғ., 71

³Шәкәрім Университеті,

071410, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20А

*e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com

КРЕМНИЙДІ (SiO₂/SiOx/Si) ӘРТҮРЛІ ӘДІСТЕРМЕН ЕНГІЗУ АРҚЫЛЫ МХЕНЕ АРҚЫЛЫ АЛЫНҒАН МАТЕРИАЛДАРДЫ МОДИФИКАЦИЯЛАУ: СИНТЕЗ ӘДІСТЕРІН ЖӘНЕ БАЛАМА БЕТТІК МОДИФИКАЦИЯЛАРДЫ ӨЗІРЛЕУ

Аңдатпа: МХене – өтпелі металдардың екі өлшемді карбидтері мен нитридтеріне жататын перспективалы материалдар класы. Олар жоғары электр өткізгіштік, үлкен беттік аудан, гидрофильділік және беткі құрамының икемділігі сияқты бірегей қасиеттердің үйлесімі арқасында кең ғылыми қызығушылыққа ие. Бұл қасиеттер МХене-ді энергия сақтау, сенсорлар, электрокатализ, сүзгілеу және қоршаған ортаны тазарту салаларында қолдануға мүмкіндік береді. Дегенмен, тотығуға бейімділік пен ұзақ мерзімді тұрақтылықтың жеткіліксіздігі оларды практикалық қолдануда шектейтін маңызды факторлар болып табылады.

Осы шектеулерді еңсеру мақсатында кремнийге негізделген модификациялар – атап айтқанда Si, SiO₂ және SiOx қолдану – МХене құрылымының тұрақтылығын арттырудың тиімді стратегиясы ретінде ұсынылуда. Бұл шолу кремнийқұрамды компоненттерді пайдалану арқылы жүзеге асырылатын функционализация әдістерін талдайды. Олардың қатарына сол-гель синтезі, Штебер әдісі, газ фазасындағы химиялық тұндыру (CVD), атом қабатын тұндыру (ALD) және бүрку тәсілдері жатады.

Кремниймен модификациялау материалдардың тотығуға төзімділігін, термиялық тұрақтылығын, беттік ауданын және композиттермен үйлесімділігін жақсартады. Мұндай жақсартылған қасиеттер кремнийлі МХене-дердің литий- және алюминий-ионды аккумуляторлар, суперконденсаторлар, сенсорлар мен катализаторлардағы өнімділігін арттырады. Сонымен қатар, олардың фотокатализ бен зиянды заттарды адсорбциялау қабілеті қоршаған ортаны қорғау технологияларында қолдануға мүмкіндік береді. Бұл шолу болашақта МХене материалдарын көпфункционалы жүйелерге біріктірудің тұрақты әрі масштабталатын әдістерін де қарастырады.

Түйін сөздер: МХене, кремний диоксиді (SiO₂), беттік модификация, энергия сақтау, су тазарту, фотокатализ

1. Кіріспе

МХенес – А элементін (әдетте Al немесе Si сияқты 13 немесе 14 топ элементі) [1] селективті қышқылмен өңдеу арқылы МАХ қабатты фазаларынан алынған екі өлшемді карбидтердің, нитридтердің және өтпелі металл карбонитридтерінің жаңа класы. МХенес жалпы формуласы, M_{n+1}X_nT_x (мұндағы n = 1-3, M – ерте өтпелі металл, X – C және/немесе N, ал T функционалы – беттік функционалды топтар) олардың оңай реттелетін құрылымы мен химиялық құрамын көрсетеді. 2011 жылы Naguib пен оның авторлары Ti₃C₂T_x қосылысын алғашқы рет МХене ретінде сипаттаған [2], және 2017 жылы Anasori және Gogotsi бастаған зерттеулер 30-дан астам эксперименттік МХене түрлерін синтездеді және мыңдаған теориялық болжамдарды дамытты [1].

Олардың жоғары электрөткізгіштік, үлкен арнайы беткі ауданы, гидрофильділік және қабаттар арасын реттей алу қабілетінің ерекше үйлесімі бар МХене, көптеген салаларда әмбебап болып саналды. Атап айтқанда, олар энергияны сақтау (литий-ионды, натрий-ионды және мырыш-ионды аккумуляторлар; суперконденсаторлар) [1], электромагниттік кедергілерден қорғау [3], фотокатализ [4], биосенсорлық [5] және мембраналық технологиялар [6] саласында тамаша өнімділікті көрсетті.

Алайда, әлеуетіне қарамастан, бастапқы МХене-дерді қолдану ішкі бірқатар шектеулермен байланысты [7]. Олар тотығуға бейім, әсіресе сулы және ылғалды ортада, бұл өнімділікті айтарлықтай нашарлатады және сақтау мерзімін шектейді [8]. Күшті Ван-дер-Вальс

күштеріне байланысты нанолистерді толықтыру электрохимиялық қосымшаларда қол жетімді беткі аймақ пен иондардың диффузиясын шектейді [9]. Олардың химиялық реактивтілігі мен беткі қабатының тоқтауы ою әдісіне байланысты өзгеріп отырады, бұл бақылау мен репродуктивтілікті қиындатады [10].

Осы мәселелерді шешу үшін беттік модификация полимерлі беттерді тұрақтандыру мен функционалдандырудың маңызды стратегиясына айналды [11]. Әр түрлі әдістердің ішінде кремний негізіндегі материалдарды, соның ішінде SiO_2 , SiO_x және элементті кремнийді қолдану арқылы модификациялау әсіресе тартымды [12]. Кремний қосылыстарының бірқатар артықшылықтары бар:

- SiO_2 бетінің реактивтілігін айтарлықтай төмендетпестен тотығуды болдырмайтын қорғаныс, оқшаулағыш қабықты қамтамасыз етеді [13];
- SiO_x қабаттарын "ядро-қабық" жүйелерін немесе қалыңдығы мен кеуектілігі реттелетін гибриді жүйелерді құру үшін пайдалануға болады [14].
- Si элементтері электрохимиялық реакцияларға қатыса алады (мысалы, батарея анодтары), көлемнің өзгеруін өтеу және электронды тасымалдауды жақсарту үшін МХеке синергетикалық өзара әрекеттеседі.

«Жасыл химия» саласындағы соңғы жетістіктер кремний диоксидін ауыл шаруашылығы қалдықтары мен кен өндіру өнеркәсібінің қосалқы өнімдерінен, мысалы, күріш қауызынан, бидай сабанынан және ұшпа күлден синтездеуге мүмкіндік берді. Бұл биогендік немесе қалдықтардан алынған кремний диоксиді шығындар мен қоршаған ортаға әсерді төмендетіп қана қоймайды, сонымен қатар оксен-кремний диоксиді гибридінің функционалдығын жақсартатын бірегей микроқұрылымдық қасиеттерге ие.

Бұл шолуда біз кремний негізіндегі стратегияларды қолдана отырып, МХеке материалдарын өзгерту үшін қолданылатын әртүрлі әдістердің толық сипаттамасы ұсынылады (1-кесте). Химиялық синтездің дәстүрлі тәсілдері де, қалдықтардан кремний диоксидін біріктірудің тұрақты жолдары да зерттеледі. Шолу сонымен қатар алынған құрылымдық, электрохимиялық және экологиялық жақсартуларды көрсетеді, және МХеке мен кремний бар материалдар арасындағы синергияны талқылайды. Жаңа будандар мен экологиялық таза қайта өңдеу технологияларын қоса алғанда, болашақ зерттеулердің мүмкіндіктерін сипаттайды.

Кесте 1 – МХеке шектеулері мен модификация тәсілдерінің қысқаша мазмұны

| Шектеу | Әсері | Кремний модификациясының шешімі | Сілтеме |
|--------------------|--------------------------------------|--|---------|
| Тотығу | Пайдалану сипаттамаларының нашарлауы | Белсенді беттерді қорғау үшін SiO_2 қабықшасы (жабындысы) | [15] |
| Қорларды толықтыру | Бетінің ауданын азайту | Тығыздағыш ретінде кеуекті кремний диоксиді | [16] |
| Нашар айналым | Механикалық тұрақсыздық | Si-MХеке композитінің буферлеуі | [17] |

2. МХеке бетінің химиялық құрамы және реактивтілігі

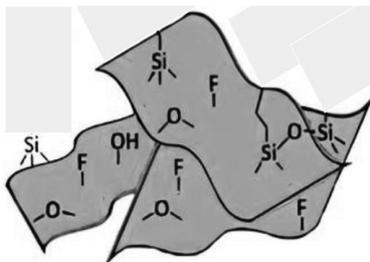
МХеке оңай реттелетін беткі химиялық құрамға ие, ол негізінен гидроксил (-ОН), фторид (-F) және оксид (-O) ұштары сияқты МАХ фазаларын қышқылмен өңдеу кезінде пайда болатын функционалды топтармен анықталады [18]. Бұл топтар су ортасындағы коллоидтық тұрақтылық үшін шешуші ғана емес, сонымен қатар беттің кейінгі модификацияларында және оны қолдануда шешуші рөл атқарады. –ОН және –O топтарының болуы гидрофильділікті арттырады және әртүрлі компоненттермен, соның ішінде кремний негізіндегі қосылыстармен сутектік байланыстар мен электростатикалық өзара әрекеттесуді қамтамасыз етеді [19]. Бұл МХеке-ді тұрақтылықты арттыру және олардың электрохимиялық қасиеттерін бейімдеу үшін кремний диоксиді (SiO_2), кремний субоксиді (SiO_x) немесе элементар кремний функционализациясына перспективалы етеді [15].

Алайда, модификациялауға мүмкіндік беретін бірдей беткі химия да өзгерістерді тотығу бұзылуына өте сезімтал етеді. –ОН және –F топтамалары, әсіресе ашық ауада немесе су ортасында болғанда, өтпелі металл қабаттарының (мысалы, Ti-дің TiO_2 -ге дейін) тотығуын жеделдетуі мүмкін, бұл өз кезегінде өткізгіштік пен құрылымдық тұтастыққа зиян келтіреді [20].

Кремний негізіндегі модификация процестері кезінде, әсіресе золь-гель немесе гидротермиялық әдістерді қамтитындар, бұл осалдық температураның жоғарылауымен, қышқыл/сілтілік жағдайлармен немесе су мен оттегінің ұзақ уақыт әсер етуімен нашарлайды. Осылайша, модификация кезінде МХене функционалдығын сақтау үшін технологиялық параметрлерді дәл бақылау және тұрақтандырғыш агенттерді немесе қорғаныс жабындарын пайдалану қажет [21].

Сонымен қатар, МХене-нің соңғы топтары мен кремний қосылыстары арасындағы химиялық үйлесімділік гибриді құрылымның түзілу сәттілігін анықтайды. Зерттеулер көрсеткендей, –О және –О–ға бай МХенесиланол топтарымен (Si-OH) әрекеттесіп, кремнеземді жабындар түзеді, нәтижесінде Si–O–Ti қатты фазааралық қосылыс пайда болады [22]. Мұндай өзара әрекеттесулер энергияны сақтау, сенсорлық және қоршаған ортаға қолдану үшін берік МХене-silicon композиттерін жасау үшін пайдалы. Осылайша, МХене бетінің реактивтілігін түсіну және бақылау кремний негізіндегі функционализация стратегияларын әзірлеу үшін өте маңызды.

1-суретте МХене бетіндегі функционалдық топтардың (–ОН, –F, –О) болуын, олардың SiO₂, SiO_x және элементтік Si сияқты кремний түрлеріне қатысты реактивтілігін және модификация процесінде тотығуға байланысты мәселелерді бейнелейтін МХене бетінің химиялық құрамының схемалық бейнесі көрсетілген. Жоғарғы контур гибриді материалды қалыптастыру үшін ықтимал өзара әрекеттесулерді көрсетеді, ал төменгі контур бетті өзгерту кезінде пайда болатын тотығуға байланысты деградацияны көрсетеді.



Сурет 1 – МХене бетінің химиялық құрамы және реактивтілігі.
Сурет [23] бойынша алынып, бейімделген

3. Кремний негізіндегі модификация стратегиялары

3.1. SiO₂ жабыны

Кремний диоксиді (SiO₂) жабындары бетті пассивтеу және тотығудың алдын алу қабілетіне байланысты полимерлердің бетін өзгертудің ең көп қолданылатын тәсілдерінің бірі болып табылады. Синтездеудің ең тиімді әдістеріне алкоголь немесе су ортасында тетраэтилортосиликат (TEOS) сияқты кремний прекурсорларының гидролизі мен конденсациясына негізделген золь-гель әдістері мен штепсель әдістері жатады [24]. Бұл әдістер жабынның қалыңдығын, кеуектілігін және бөлшектердің морфологиясын дәл бақылауды қамтамасыз етеді, бұл МХене бетінде кремнийдің біркелкі қабаттарын қалыптастыруға мүмкіндік береді.

SiO₂-мен қапталған МХенес нәтижесінде су мен оттегінің реактивті беттік топтарға (–ОН, –F, –О) жетуіне жол бермейтін кремний диоксиді қабатының тосқауыл қасиеттеріне байланысты экологиялық және химиялық тұрақтылық айтарлықтай жақсарды. Сонымен қатар, Бейорганикалық кремний диоксиді қабықшасы МХенес–тің ішкі электр өткізгіштігіне айтарлықтай әсер етпейді, әсіресе ультра жұқа қабат ретінде қолданылғанда және силанол топтарының (Si-OH) көп болуы арқылы одан әрі функционализацияға ықпал етуі мүмкін [25].

Мұндай SiO₂ модификациялары әсіресе электрохимиялық энергияны сақтау, фотокатализ және мембраналық технологиялар сияқты қолданбаларда тиімді, мұнда тотығу бұзылыстары немесе бетінің ластануы проблемасы туындайды. Сонымен қатар, кремнийлі жабындардың механикалық беріктігі МХене негізіндегі наноқұрылымдардың қатал жағдайларда беріктігін арттырады, олардың практикалық қолданылуын кеңейтеді.

3.2. SiO_x қабатын қалыптастыру

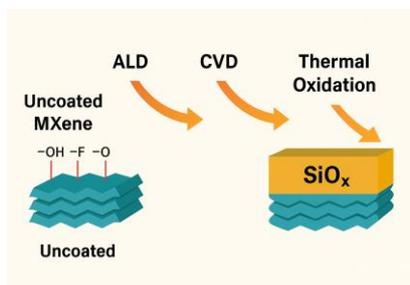
Сызықтық беттерде субстехиометриялық кремний оксиді қабаттарының (SiO_x, мұндағы $x < 2$) түзілуі атомдық дәлдікпен бет қасиеттерін жасау үшін әмбебап фрезерлік станокты қамтамасыз етеді. Осы мақсатта әдетте атомдық қабатты тұндыру (ALD), газ фазасынан

химиялық тұндыру (CVD) және термиялық тотығу сияқты әдістер қолданылады [26]. Бұл әдістер реттелетін қалыңдығы мен тотығу дәрежесі бар конформды ультра жұқа оксидті пленкаларды қалыптастыруға мүмкіндік береді, осылайша MXene құрылымы мен электр өткізгіштігін сақтай отырып, фазалық интерфейс сипаттамаларын бейімдейді [27].

ALD – әсіресе, өздігінен шектелетін беттік реакциялар есебінен SiOx қабатының өсуін нанометрлік дәлдікпен бақылауға мүмкіндік беретін тиімді әдіс. Бұл тәсіл жоғары беттік ауданы бар MXene үлпектерінде де біркелкі жабынды мен жоғары қайта жаңғыртылымдылықты (репродуктивтілікті) қамтамасыз етеді. Екінші жағынан, CVD әдісі масштабтауға және жабындының жоғары түсу жылдамдығына қолайлы, алайда ол көбіне MXene деградациясының алдын алу үшін мұқият оңтайландыруды талап ететін жоғары өңдеу температураларын қажет етеді [28]. Ал термиялық тотығу – қарапайым және арзан процесс болғанымен, көбінесе беткі модификациямен шектеледі және егер қатаң бақылауға алынбаса, біркелкі емес оксид қабаттарының түзілуіне әкелуі мүмкін.

SiOx қабаты диффузиялық тосқауыл және беттік пассивті қабат ретінде қызмет атқарады, бұл оның экологиялық тұрақтылығын арттырып, қоршаған ортадағы немесе жоғары ылғалдылық жағдайындағы тотығу жылдамдығын төмендетеді. Сонымен қатар, SiOx-тағы ішінара тотығу дәрежесі интерфейсстің электрондық қасиеттері мен химиялық реактивтілігін дәл реттеуге мүмкіндік береді, бұл оны аккумулятор электродтарында, мембраналық бөлуде және сенсорлық технологияларда кеңінен қолдануға мүмкіндік береді. SiOx қабатының қалыңдығын және тотығу күйін реттеу мүмкіндігі MXene–SiOx гибридтерін жетілдірілген көпфункционалы жүйелерге тиімді біріктіру үшін аса маңызды [29].

Атомдық қабатты тұндыру (ALD), газ фазасының химиялық тұндыру (CVD) және термиялық тотығу әдістерінің көмегімен қозғалмалы субстратқа SiOx қабатын жабудың схемалық көрінісі (Сурет 2). Суретте SiOx-тың конформды бейімделетін жабын (conformal coating) түзілу процесі көрсетілген, сондай-ақ қабат қалыңдығын және тотығу дәрежесін дәл бақылау мүмкіндіктері бейнеленген. Бұл теңшелетін интерфейс тұрақтылығын арттырып, MXene негізіндегі озық жүйелерге функционалды интеграция жасауға мүмкіндік береді.



Сурет 2 – ALD, CVD және термиялық тотығу арқылы қабатты қалыптастыру

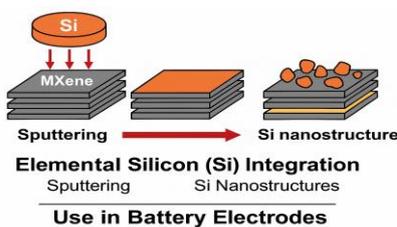
3.3. Қарапайым кремний интеграциясы (Si)

Қарапайым кремнийді (Si) MXene архитектурасына біріктіру – бұл, әсіресе литий-ионды және натрий-ионды аккумуляторлар сияқты энергия сақтау жүйелері үшін жоғары өнімді материалдарды әзірлеуге бағытталған стратегиялық қадам. Жоғары теориялық сыйымдылығы (~4200 мА·сағ·г⁻¹) арқасында кремний ұзақ уақыт бойы перспективалы анодтық материал ретінде қарастырылып келеді. Алайда, литияция кезінде орын алатын айтарлықтай көлемдік кеңею мен төмен электр өткізгіштік секілді кемшіліктер оның практикалық қолданылуын шектейді. Кремнийді MXene-мен гибридету – бұл аталған кемшіліктерді еңсерудің синергетикалық тәсілі, мұнда MXene-нің механикалық тұрақтылығы, жоғары электрөткізгіштігі және құрылымдық бейімділігі пайдаланылады.

Кремнийді интеграциялау үшін екі негізгі әдіс қолданылады: физикалық бүрку және кремнийдің нанокұрылымдарын енгізу (мысалы, нанобөлшектер, наноөткізгіштер немесе жұқа қабықшалар). Магнетрондық бүрку сияқты әдістер арқылы кремнийдің біртекті қабаттары MXene бетіне тікелей жағылады, мықты интерфейстер қалыптастырады және электрон тасымалы жолдарын жақсартады. Сонымен қатар, Si нанокұрылымдарын in situ өсіру, ерітінді негізіндегі тұндыру немесе механикалық араластыру арқылы MXene-ге ендіру сыйымдылықтың сақталуын жақсартады және заряд/разряд циклдары кезінде көлемдік деформацияны азайтады [30].

Полимерлі композиттер электрохимиялық циклдау кезінде тұрақтылықты арттырады, жоғары электрөткізгіштік қамтамасыз етеді және құрылымдық деформацияға төзімділігін күшейтеді. Сонымен қатар, кремний мен MXene беткі топтары (-OH, -F, -O) арасындағы фазааралық байланыс электрондардың интерфейс арқылы адгезиясы мен тасымалдауын жақсартады, ал MXene матрицасы иілгіш тірек ретінде қызмет етеді. Бұл гибридік жүйелер бір ұялы (Li-ion) батареяларда перспективалы нәтиже көрсетті және қазіргі уақытта суперконденсаторлар, гибриді сыйымдылық жүйелері және қатты күйдегі батареяларда зерттеуге алынууда.

3-суретте көрсетілген схема MXene құрылымдарына қарапайым кремнийді енгізудің екі негізгі тәсілін бейнелейді: (1) MXene бетіне кремнийдің біртекті қабаты қолданылатын бүрку және (2) нанобөлшектер немесе кластерлер сияқты кремний наноқұрылымдарын енгізу. Бұл гибридік материалдар кремнийдің жоғары сыйымдылығын MXene өткізгіштігі мен икемділігімен үйлестіру арқылы электрохимиялық өнімділікті жақсартады, бұл циклдің тұрақтылығы мен құрылымдық тұтастығымен жақсартылған аккумуляторлық электрод архитектурасын пайдалануға мүмкіндік береді [31].



Сурет 3 – Батарея электродтарын жасау үшін MXene-ге қарапайым кремний (Si) интеграциясы

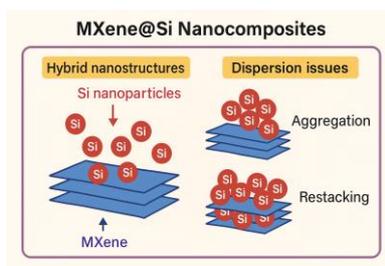
3.4. MXene @ Si наноккомпозиттері

Si@MXene наноккомпозиттері – жоғары теориялық сыйымдылыққа ие кремнийді MXene материалдарының электр өткізгіштігімен, механикалық икемділігімен және қабатты морфологиясымен біріктіретін гибридік материалдардың жаңа буыны болып табылады. Бұл гибридік наноқұрылымдар, әдетте, кремнийді (нанобөлшектер, наноөткізгіштер немесе жұқа қабықшалар түрінде) MXene наноқабаттарымен физикалық араластыру немесе химиялық әдістермен біріктіру арқылы синтезделеді. Мұндай әдістер интерфейстің тығыз байланысын қамтамасыз етіп, синергетикалық электрохимиялық қасиеттерге қол жеткізуге мүмкіндік береді – бұл энергияны сақтау құрылғыларының өнімділігін арттырады. [32].

Интеграция стратегиясы көбінесе әр компоненттің шектеулерін жеңілдетуге бағытталған: MXene салыстырмалы түрде жоғары өткізгіш матрица мен көлем кеңеюін буферлеуші рөл атқарып, кремнийдің литиймен литизация кезінде едәуір көлемдік өзгеруін бақылауда ұстауға мүмкіндік береді, ал кремний артығырақ заряд сақтау сыйымдылығын қамтамасыз етеді. Дегенмен, MXene матрицасында кремнийдің біркелкі таралуын қамтамасыз ету маңызды мәселе болып қала береді. Кремний бөлшектері ван-дер-Ваальс күштері немесе фазааралық үйлесімділіктің төмендігі нәтижесінде MXene аралық қабаттарында агрегацияға бейім болып, электрондық және иондық тасымалдарға кедергі жасап, ұзақ циклдер кезінде механикалық тұрақсыздық туғызуы мүмкін [33].

Осы дисперсиялық мәселелерді шешу үшін әртүрлі техникалық стратегиялар ұсынылды, соның ішінде MXenes бетінің функционализациясы, полимерлі байланыстырғыштарды пайдалану және MXene үлпектерінде Si эмбриондарының біртекті түзілуіне ықпал ететін *in situ* өсіру әдістері. Алынған наноккомпозиттер жылдамдық өнімділігін, цикл тұрақтылығын және механикалық тұрақтылықты жақсартады, бұл оларды литий-ионды және натрий-ионды аккумуляторлар, сондай-ақ икемді электроника және гибридік сыйымдылық жүйелері сияқты жаңа буын энергия сақтау құрылғылары үшін тартымды етеді.

Mxene@Si наноккомпозиттерінің схемалық иллюстрациясы кремний нанобөлшектерін (Si) MXene қабатты парақтарымен біріктіру арқылы жасалған гибридік наноқұрылымды көрсетеді (Сурет 4). Сол жақ панель mxene матрицасында кремнийдің тамаша дисперсиясын көрсетеді, ал оң жақ панель иондардың тасымалдануына және механикалық тұрақтылыққа теріс әсер етуі мүмкін кремний бөлшектерінің агрегациясы мен қайта бөлінуін қоса алғанда, жалпы мәселелерді көрсетеді. Тиімді дисперсиялық стратегиялар MXene–si композиттерінің электрохимиялық өнімділігін оңтайландыру үшін өте маңызды.



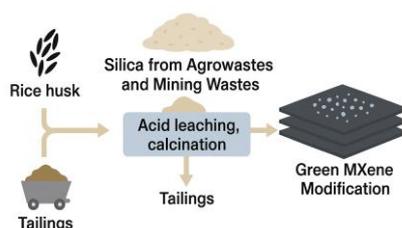
Сурет 4 – Мхене@Si нанокөміпозиттік құрылымдары және олардың дисперсиялық мәселелері

3.5. Ауыл шаруашылығы және тау-кен қалдықтарынан алынған кремний диоксиді

Ауыл шаруашылығы мен тау-кен қалдықтарынан кремний диоксидін (SiO_2) алу МХене бетін өзгерту үшін функционалды материалдарды алудың экологиялық және тұрақты әдісін ұсынады. Күріш қабығы, қант қамысы торты және бидай сабаны сияқты биомасса қалдықтары, сондай-ақ құйрықтар мен көмір күлі сияқты тау-кен өнімдерінің жанама өнімдері кремний диоксидіне бай және қымбат емес және мол ресурстар болып табылады. Қалдықтардан алынған бұл көздер қоршаған ортаның ластануын азайтып қана қоймайды, сонымен қатар материалтану саласындағы айналмалы экономиканың дамуына ықпал етеді [34].

Қалдықтарды өңдеудің типтік әдісі – алдымен HCl немесе HNO_3 көмегімен қышқылды шаймалау арқылы металдар мен сілтілі компоненттерді алып тастау. Содан соң биомасса органикалық құрамынан азатталып, аморфтық немесе жартылай кристалды SiO_2 -ге айналдыру үшін $500\text{-}800\text{ }^\circ\text{C}$ температурада кальцинацияланады. Кальцинация арқылы алынған кремнеземнің беткі ауданы, кеуектілігі және морфологиясы оңтайландырылуы мүмкін, бұл оны МХене гибридіт жүйелерінде қолдануға жарамды етеді. Мысалы, күріш қабығынан алынған биогенді SiO_2 МХене-көміпозиттерінде қабықша материалы немесе қабат аралық төсем ретінде пайдаланылып, тотығуға беріктігін және бет функционалдығын арттыра алады [35].

МХене құрылымына енгізілгенде, бұл "жасыл" SiO_2 пішіні мен қолдану тәсіліне байланысты тосқауыл қабаты, құрылымдық тірек немесе электрохимиялық модификатор қызметін атқара алады (Сурет 5). Сонымен қатар, биогенді кремний әдеттегі синтетикалық SiO_2 -ге қарағанда ерекше микрқұрылымдық қасиеттерге ие (мысалы, жоғары дисперсия, біркелкі емес кеуектілік), бұл оны энергетика, катализ және суды тазарту сияқты қолдану салаларында артықшылықты етеді. Бұл тәсіл жасыл химия және тұрақты нанотехнология қағидаттарына сәйкес келеді [36].



Сурет 5 – «Жасыл» Мхене-мен модификациялау үшін ауыл шаруашылығы мен тау-кен қалдықтарынан кремний диоксидін алу

4. Модификацияның жаңа және гибридіт әдістері

Кремний негізіндегі дәстүрлі стратегиялардан бөлек, МХене материалдарының әмбүрлігін, тұрақтылығын және функционалдылығын арттыру үшін жаңа гибридіт модификация әдістері белсенді зерттелуде. Оларға силан байланыстырушыларды енгізу, органикалық-бейорганикалық будандар қолдану, биосинтез әдістері, сондай-ақ басқа оксидтер мен металдармен легирлеу кіреді. Әр тәсіл – ерекше құрылымдық және фазааралық артықшылықтарды қамтамасыз етеді [37].

3-аминопропилтриэтоксисилан (APTES) және глицидоксипропилтриметоксисилан (GPTMS) сияқты силан байланыстырғыш агенттер $-\text{OH}$ немесе $=\text{O}$ -терминалдары бар

беттерге ковалентті байланыстар арқылы бекініп, полимерлер мен органикалық функционалды фрагменттер арасында күшті молекулалық көпірлер түзеді. Бұл интерфейс тұрақтылығын, адгезияны және химиялық теңшелімдікті арттырып, мембраналар, биосенсорлар мен композиттік пленкалар үшін жаңа органикалық – бейорганикалық гибриді материалдарды жасауға мүмкіндік береді [38].

Биосинтез әдістері табиғи материалдар негізінде экологиялық таза және тиімді бет модификациясын қамтамасыз етеді – бұл өсімдік сығындыларын, аминқышқылдарын немесе биополимерлерді тұрақтандырғыш немесе үлгі ретінде пайдалануға негізделген. Бұл тәсілдер уытсыз, биоактивті немесе редокс-топтарымен жабдықталған MXene құрылымдарын алуға мүмкіндік беріп, биомедициналық және экологиялық қолданбалар үшін тартымды шешімдер ұсынады [39].

Сонымен қатар, MXene материалын Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO сияқты оксидтер және Fe, Cu тәрізді өтпелі металдармен легирлеу әдістеріне қызығушылық артып келеді. Бұл модификациялар электрон құрылымын, беттік зарядты және химиялық функционалдылықты өзгертіп, MXene-дің фотокаталитикалық қасиеттерін, магнетизмін, энергия сақтау және сенсорлық қабілеттерін жетілдіре алады. Легирленген компоненттер мен MXene құрылымдары арасындағы синергия өткізгіштік пен каталитикалық белсенділікті арттырып, қолданым ауқымын кеңейтеді [40].

Бұл гибриді модификация әдістері жаңа буын смарт материалдар мен нанотехнологиялар трендтеріне сәйкес келетін көп функциялы MXene материалдарын жасауға жол ашады.

5. Кремний модификацияланған полимерлерді қолдану

Кремний негізіндегі MXenes модификациясы химиялық тұрақтылықты, беттік белсенділікті және функционалдық теңшелімді жақсарту арқылы олардың әртүрлі қолданбаларда тиімділігін айтарлықтай арттырады. Келесі бөлімдерде кремний модификацияланған MXenes айтарлықтай әсер еткен негізгі аймақтар берілген:

5.1. Қуат сақтау құрылғылары: батареялар мен суперконденсаторлар

MXene- SiO_2 және MXene-Si композиттері литий-ионды, натрий-ионды және мырыш-ионды аккумуляторлар үшін, сондай-ақ суперконденсаторларда қолдануға керемет потенциалға ие. SiO_2 немесе қарапайым кремнийдің қосылуы көлемдік өзгерістерді буферлеп, циклдік тұрақтылықты жақсартады және ион диффузия жолдарын жеңілдетіп, MXene қабаттарының реорганизациясын азайтады. Қысқаша айтқанда, Si модификацияланған MXene анодтары өткізгіш қабаттар мен жоғары сыйымдылықты Si компонентінің синергетикалық өзара әрекетіне негізделген, бұл сыйымдылықты сақтап қалуға, заряд-разряд жылдамдығын арттыруға және ұзақ мерзімді қолдануға мүмкіндік береді [41].

5.2. Фотокатализ

SiO_2 қабаттарын әртүрлі катализдік беттерге орналастыру жарық сіңірілімін, жолақ спектрін және заряд бөліну тиімділігін жақсартады. Кремнеземді қабық немесе матрица – каталитикалық орталықтарды тұрақтандыруға негіз болып, жарықтың шашырауын немесе туралануын реттей отырып, фотокаталитикалық белсенділікті арттырады. Мұндай композициялар фотодеградация, сутек бөлу реакциялары (HER) және CO_2 төмендету сияқты таза энергетика мен қоршаған ортаны қалпына келтіруде өзекті [42].

5.3. Сенсорлық қолданбалар

Si-модификацияланған MXene сенсорлар үшін селективтілік, беттік тұрақтылық және сигнал күшейту қасиеттерін жақсартады. SiO_2 қабаттары зонд молекулаларының бекінуіне жер ұсынса, MXene жоғары өткізгіштігі сигналды жедел тасымалдауды қамтамасыз етеді. Мұндай жүйелер металл иондарды, биомолекулаларды және ұшпа органикалық қосылыстарды жоғары сезімталдықпен және қайталанбалы түрде анықтай алады [43].

5.4. Суды тазарту

Суды тазарту кезінде Si-модификацияланған MXene жоғары төзімділік пен структуралық тұрақтылықпен ерекшеленеді. SiO_2 қабаты тотығудан қорғайды, ал белсенді SiO_2 беті ауыр металдар, бояғыштар және фармацевтикалық қалдықтарды тиімді сіңіруге және каталитикалық ыдыратуға мүмкіндік береді. Биогенді “жасыл” SiO_2 экологиялық таза сүзгі материалы ретінде масштабталатын жүйелер үшін қолданылады [44].

6. Болашақ мәселелері мен болашағы

Кремний негізіндегі МХене модификациясындағы айтарлықтай жетістіктерге қарамастан, олардың коммерциялық өміршеңдігі мен кеңірек қолданылуын қамтамасыз ету үшін шешілуі керек бірқатар маңызды мәселелер бар. Бұл шектеулер техникалық, экологиялық және әдістемелік аспектілерді қамтиды және оларды жеңу үшін үйлестірілген зерттеу жұмыстары қажет.

6.1. Масштабтау және репродуктивтілік

Кремниймен модификацияланған полимерлі МХене композиттерін синтездеу көбінесе көп сатылы, уақытты қажет ететін процестерді (мысалы, золь-гель, атомдық қабатты тұндыру, гидротермиялық әдістер) талап етеді, бұл оларды өндірістік масштабна шығару қиынға соғады. Сонымен қатар, прекурсорлардың сапасы, беткі қоршаған жағдайлар және дисперсияны бақылаудың қиындығы партиядан партияға тұрақсыздық әкеледі. Зертханалық технологияларды өнеркәсіптік деңгейге аудару үшін үздіксіз синтез және стандартталған өндірістік хаттамалар мен платформа әзірлеу қажет [45].

6.2. Қоршаған ортаны қорғау және денсаулық туралы ойлар

HF, TEOS және ұшпа органосиландар сияқты улы прекурсорларды пайдалану қауіпсіздікке және кейбір модификация әдістерінің тұрақтылығына қатысты алаңдаушылық туғызады. Сонымен қатар, МХене-Si композиттерінің биоүйлесімділігі мен қоршаған ортаға әсері жайлы мәліметтер шектеулі, әсіресе су тазартуда немесе биомедициналық салаларда қолданылған жағдайда. Болашақ зерттеулер терісі, биоэнергияға негізделген көбірек экологиялық таза жолдарға басымдық беруі, сондай-ақ еріткішсіз әдістерді дамытуы қажет [46].

6.3. Болашақ зерттеулерге арналған ұсыныстар

МХене беткі топтары мен кремний бөлшектерінің өзара әрекеттесуін атомдық деңгейде зерттеу есептеу әдістері мен тәжірибелік сипаттамалар негізінде жүргізіледі. Бұл өзара әрекеттесу механикалық және атомаралық байланыстар тұрғысынан қарастырылады. Сонымен қатар, нақты қолдану жағдайларында (мысалы, су жүйелері мен жоғары кернеу циклдері кезінде) ұзақ мерзімді тұрақтылық термиялық, химиялық және электрохимиялық жағынан бағаланады. Бұдан бөлек, МХене-ді бірнеше функционалды компоненттермен (мысалы, металл оксидтері немесе өткізгіш полимерлермен SiO₂) біріктіру арқылы жаңа гибриді функционалды жүйелер құрылып, олардың жұмыс сипаттамалары жақсара түседі. Сондай-ақ, кремний негізіндегі МХене модификациясының өмірлік циклін (LCA) талдау арқылы энергия шығындары, қолданылған материалдар және шығарындылар көлемі сандық түрде бағаланады, бұл экодизайнды тиімді басқаруға мүмкіндік береді [47]. Аталған зерттеу бағыттарына қатысты негізгі ақпараттар 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2 – Мхенес кремниймен модификацияланған проблемалар мен даму бағыттарының қысқаша сипаттамасы

| Санат | Мәселелер | Болашаққа арналған бағыттар/ұсыныстар |
|---|--|--|
| Масштабтау және репродуктивтілік | Күрделі көп сатылы синтез | Үздіксіз / автоматтандырылған синтезді дамыту |
| Қоршаған ортаны қорғау және адам денсаулығы | Партиядан партияға төмен консистенция | Хаттамалар мен есептілікті стандарттау |
| Тұрақтылық және беріктік | Қауіпті химиялық заттарды қолдану (HF, TEOS) | Экологиялық синтезге басымдық беру (мысалы, биогенді кремний диоксиді) |
| Механизмдерді түсіну | Уыттылық туралы деректердің болмауы | Қоршаған ортаға әсер ету және қауіпсіздік бойынша зерттеулер жүргізу |
| Функционалды интеграция | Ылғалды, термиялық немесе электрохимиялық жағдайларда ыдырау | Нақты жағдайларда ұзақ мерзімді тұрақтылық сынақтарын жүргізу |
| Тұрақтылық және өмірлік цикл | Фазааралық химия және кремний мен фенолдың өзара әрекеттесуі туралы шектеулі Білім | <i>In situ/operandi</i> әдістерін қолданыңыз |

7. Қорытынды

Бұл шолуда кремний негізіндегі MXene модификацияларының қазіргі жай-күйі мен болашақ перспективалары жан-жақты талданды. Әсіресе SiO₂ жабындары мен қабаттары, ауыл шаруашылығы және тау-кен қалдықтарынан алынатын қарапайым кремний, сондай-ақ экологиялық таза кремний диоксидін қолдану стратегияларына ерекше назар аударылды. Бұл модификациялар бастапқы MXene-ге тән негізгі шектеулер – тотығуға бейімділік, беткі құрылымның тұрақсыздығы және шектеулі құрылымдық беріктік – сияқты мәселелерді еңсеруде елеулі әлеуетке ие екені көрсетілді.

Кремний компоненттерін енгізу бірнеше функционалдық артықшылықтар береді:

- SiO₂ жабындары пассивті қорғаныс пен химиялық тұрақтылықты қамтамасыз етеді;
- SiO₂ қабаттары интерфейсті дәл басқаруға және электрондар мен иондардың тасымалдануын тиімді реттеуге мүмкіндік береді;

- Қарапайым кремний аккумуляторларда жоғары теориялық сыйымдылықты қамтамасыз етеді;

- Биомассадан алынған кремний диоксиді экологиялық таза материалдарды дамытуда инновациялық шешімдер ұсынады.

MXene-ді кремний негізіндегі компоненттермен будандастыру нәтижесінде энергия сақтау өнімділігі, фотокаталитикалық белсенділік, химиялық сенсорлық сезімталдық және суды тазарту тиімділігі айтарлықтай артқаны байқалды. Бұл нәтижелер мұндай композиттердің ғылыми және технологиялық маңызын растап қана қоймай, сонымен қатар көпфункционалды жаңа буын наноматериалдарын жасауға берік негіз қалайды.

Алайда масштабтауға жарамдылық, экологиялық қауіпсіздік және құрылымдық қайталанушылық сияқты маңызды мәселелер әлі де өзекті. Бұл мәселелерді шешу үшін «жасыл химия» қағидаттарына негізделген тәсілдер, жергілікті сипаттамаларды нақтылау, өмірлік циклді бағалау және есептеу арқылы материалдар жобалау бағыттарында кешенді зерттеу жұмыстары қажет.

Осылайша, кремниймен модификацияланған MXene материалдары энергетика, экология және озық нанотехнологиялар салаларында зор әлеуетке ие, жоғары беріктікке ие гибриді наноқұрылымдар класы ретінде ерекшеленеді. Синтездің балама жолдарын, биогенді шикізатты және көпкомпонентті интеграцияны зерттеу арқылы MXene негізіндегі жүйелердің трансформациялық мүмкіндіктері одан әрі ашылуы мүмкін.

Әдебиеттер тізімі

1. Anasori B. 2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes) for Energy Storage / B. Anasori, M.R. Lukatskaya, Y. Gogotsi // *Nature Reviews Materials*. – 2017. – № 2. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.98>.
2. Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti₃AlC₂ / M. Naguib et al // *Advanced Materials*. – 2011. – № 23. – P. 4248-4253, <https://doi.org/10.1002/adma.201102306>.
3. A Review on MXene and Its' Composites for Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Applications / R. Verma et al // *Carbon*. – 2023. – № 208. – P. 170-190. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.03.050>.
4. A Review on MXene Synthesis, Stability, and Photocatalytic Applications / G. Murali et al // *ACS Nano*. – 2022. – № 16. – P. 13370-13429. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c04750>.
5. Two-Dimensional Transition Metal Carbides and Nitrides (MXenes) Based Biosensing and Molecular Imaging / H. Liu et al // *Nanophotonics*. – 2022. – № 11. – P. 4977-4993. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0550>.
6. MXene Materials for Designing Advanced Separation Membranes / H.E. Karahan et al // *Advanced Materials*. – 2020. – № 32. <https://doi.org/10.1002/adma.201906697>.
7. Gogotsi Y. The Rise of MXenes. / Y. Gogotsi, B. Anasori // *ACS Nano*. – 2019. – № 13. – P. 8491-8494. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b06394>.
8. Oxidation Stability of Colloidal Two-Dimensional Titanium Carbides (MXenes) / C.J. Zhang et al // *Chemistry of Materials*. – 2017. – № 29. – P. 4848-4856. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b00745>.
9. Hollow MXene Spheres and 3D Macroporous MXene Frameworks for Na-Ion Storage / M. Zhao et al // *Advanced Materials*. – 2017. – № 29. <https://doi.org/10.1002/adma.201702410>.
10. Guidelines for Synthesis and Processing of Two-Dimensional Titanium Carbide (Ti₃C₂T_x MXene) / M. Alhabeb et al // *In MXenes*; Jenny Stanford Publishing: New York, 2023. – P. 415-449.
11. MXene Films: Scalable Manufacturing of Free-Standing, Strong Ti₃C₂T_x MXene Films with

- Outstanding Conductivity (Adv. Mater. 23/2020) / J. Zhang et al // Advanced Materials. – 2020. – № 32. <https://doi.org/10.1002/adma.202070180>.
12. Enhanced Cycling Performance of Si-MXene Nanohybrids as Anode for High Performance Lithium Ion Batteries / X. Zhu et al // Chemical Engineering Journal. – 2019. – № 378. – P. 122212. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122212>.
13. Three-dimensional Structured MXene/SiO₂ for Improving the Interfacial Properties of Composites by Self-assembly Strategy / J. Guo et al // Polymer Composites. – 2021. – № 43. – P. 84-93. <https://doi.org/10.1002/pc.26358>.
14. Burgeoning Silicon/MXene Nanocomposites for Lithium Ion Batteries: A Review / P. Zhang et al // Advanced Functional Materials. – 2024. – № 34. <https://doi.org/10.1002/adfm.202402307>.
15. Three-dimensional Structured MXene/SiO₂ for Improving the Interfacial Properties of Composites by Self-assembly Strategy / J. Guo et al // Polymer Composites. – № 43. – P. 84-93. <https://doi.org/10.1002/pc.26358>.
16. Design of PDMS/SiO₂@MXene Composites with «Floatable Interlayer» Structure for the Electromagnetic Shielding Behavior Improvement / Y. Duan et al // Chemical Engineering Journal. – 2023. – № 461. – P. 141853. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141853>.
17. Ultralong Stability of Ti₃C₂T_x-MXene Dispersion Through Synergistic Regulation of Storage Environment and Defect Capping with Tris-HCl Buffering / J. Tan et al // Small Methods. – 2024. <https://doi.org/10.1002/smt.d.202301689>.
18. MXene Hydrogels: Fundamentals and Applications / Y.-Z. Zhang et al // Chemical Society Reviews. – 2020. – № 49. – P. 7229-7251. <https://doi.org/10.1039/d0cs00022a>.
19. MXene Printing and Patterned Coating for Device Applications / Y. Zhang et al // Advanced Materials. – 2020. – № 32. <https://doi.org/10.1002/adma.201908486>.
20. Applications of 2D MXenes in Energy Conversion and Storage Systems / J. Pang et al // Chemical Society Reviews. – 2019. – № 48. – P. 72-133. <https://doi.org/10.1039/c8cs00324f>.
21. Highly Electrically Conductive Three-Dimensional Ti₃C₂T_x MXene/Reduced Graphene Oxide Hybrid Aerogels with Excellent Electromagnetic Interference Shielding Performances / S. Zhao et al // ACS Nano. – 2018. – № 12. – P. 11193-11202. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b05739>.
22. Geng X. Application of MXene-Based Materials for Cathode in Lithium-Sulfur Batteries / X. Geng, L. Yang, P. Song // Chemistry – A European Journal. – 2024. – № 30. <https://doi.org/10.1002/chem.202303451>.
23. Mozafari M. Surface Functionalization of MXenes // M. Mozafari, M. Soroush // Materials Advances. – 2021. – № 2. – P. 7277-7307. <https://doi.org/10.1039/d1ma00625h>.
24. A Review of Porous Carbons Produced by Template Methods for Supercapacitor Applications / W. Zhang et al // New Carbon Materials. – 2021. – № 36. – P. 69-81. [https://doi.org/10.1016/s1872-5805\(21\)60005-7](https://doi.org/10.1016/s1872-5805(21)60005-7).
25. Jiang T. Enhanced Performance of Silicon Negative Electrodes Compositing with Titanium Carbide Based MXenes for Lithium-Ion Batteries / T. Jiang, H. Yang, G.Z. Chen // Nanoenergy Advances. – 2022. – № 2. – P. 165-196. <https://doi.org/10.3390/nanoenergyadv2020007>.
26. Solution Reactivity Studies for Identification of Promising New ALD and Pulsed CVD Reaction Chemistries / B. Vidjayacoumar et al // ECS Transactions. – 2013. – № 50. – P. 53-66. <https://doi.org/10.1149/05013.0053ecst>.
27. Stoldt C.R. Ultra-Thin Film Encapsulation Processes for Micro-Electro-Mechanical Devices and Systems / C.R. Stoldt, V.M. Bright // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2006. – № 39. – P. R163-R170. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/9/r01>.
28. Shielding 2D MXenes against Oxidative Degradation: Recent Advances, Factors and Preventive Measures / S. Kumar et al // Journal of Materials Chemistry C. – 2024. – № 12. – P. 8243-8281. <https://doi.org/10.1039/d4tc00884g>.
29. MXene-Coated Ion-Selective Electrode Sensors for Highly Stable and Selective Lithium Dynamics Monitoring / Y. Huang et al // Environmental Science & Technology. – 2023. – № 58. – P. 1359-1368. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c06235>.
30. Sustainable MXene Synthesis via Molten Salt Method and Nano-Silicon Coating for Enhanced Lithium-Ion Battery Performance / H. Kim et al // Molecules. – 2025. – № 30. – P. 812. <https://doi.org/10.3390/molecules30040812>.
31. A Flexible Si@C Electrode with Excellent Stability Employing an MXene as a Multifunctional Binder for Lithium-Ion Batteries / P. Zhang et al // ChemSusChem. – 2019. – № 13. – P. 1621-1628.

<https://doi.org/10.1002/cssc.201901497>.

32. Recent Progress in Si/Ti₃C₂T_x MXene Anode Materials for Lithium-Ion Batteries / X. Jiang et al // iScience. – 2024. – № 27. – P. 111217. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.111217>.

33. Performance and Application of Si/Ti₃C₂T_x (MXene) Composites in Lithium Ion Battery / T. Jiang et al // Journal of Physics: Energy. – 2023. – № 5. – P. 014020. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/acb6b4>.

34. Rice Husk Waste into Various Template-Engineered Mesoporous Silica Materials for Different Applications: A Comprehensive Review on Recent Developments / A.G. Gebretatios et al // Chemosphere. – 2023. – № 310. – P. 136843. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136843>.

35. Sustainable Harnessing of SiO₂ Nanoparticles from Rice Husks: A Review of the Best Synthesis and Applications / A. Rodriguez-Otero et al // Processes. – 2023. – № 11. – P. 3373. <https://doi.org/10.3390/pr11123373>.

36. Mesoporous Silica with an Alveolar Construction Obtained by Eco-Friendly Treatment of Rice Husks / M. Popova et al // Molecules. – 2024. – № 29. – P. 3540. <https://doi.org/10.3390/molecules29153540>.

37. Covalent Stabilization and Functionalization of MXene via Silylation Reactions with Improved Surface Properties / J. Ji et al // FlatChem. – 2019. – № 17. – P. 100128. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2019.100128>.

38. Surface Modification of a MXene by an Aminosilane Coupling Agent / H. Riazi et al // Advanced Materials Interfaces. – 2020. – № 7. <https://doi.org/10.1002/admi.201902008>.

39. Mozafari, M.; Soroush, M. Surface Functionalization of MXenes / M. Mozafari, M. Soroush // Materials Advances. – 2021. – № 2. – P. 7277-7307. <https://doi.org/10.1039/d1ma00625h>.

40. Interfacial Charge Transfer and Interaction in the MXene/TiO₂ Heterostructures Available / L. Xu et al; online: <https://arxiv.org/abs/2107.09180>.

41. Recent Developments in Photocatalytic Water Treatment Technology with MXene Material: A Review / N. Xu et al // Chemical Engineering Journal Advances. – 2022. – № 12. – P. 100418. <https://doi.org/10.1016/j.cejadv.2022.100418>.

42. MXene-Based Composite Photocatalysts for Efficient Degradation of Antibiotics in Wastewater / M. Akbari et al // Scientific Reports. – 2024. – № 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83333-3>.

43. MXene-Based Flexible Sensors: A Review / S. Hajian et al // Frontiers in Sensors. – 2022. – № 3. <https://doi.org/10.3389/fsens.2022.1006749>.

44. Recent Progress in MXene-Based Materials for Water Treatment Application: A Review / L. Song et al // Journal of Water Process Engineering. – 2025. – № 72. – P. 107640. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107640>.

45. Engineering the next Generation of MXenes: Challenges and Strategies for Scalable Production and Enhanced Performance / W. Bao et al // Nanoscale. – 2025. – № 17. – P. 6204-6265. <https://doi.org/10.1039/d4nr04560b>.

46. Synthesis, Toxicity Assessment, Environmental and Biomedical Applications of MXenes: A Review / I.A. Vasyukova et al // Nanomaterials. – 2022. – № 12. – P. 1797. <https://doi.org/10.3390/nano12111797>.

47. MXenes for Sustainable Energy: A Comprehensive Review on Conservation and Storage Applications / M. Jussambayev et al // Carbon Trends. – 2025. – № 19. – P. 100471. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100471>.

Алғыс. Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (грант № BR24992873).

М. Әліпұлы^{1*}, Қ. Асқарұлы¹, Қ. Тоштай², Н.Н. Нұрғалиев³, С. Азат¹

¹Satbayev Univeristy,

050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

²Казахский национальный университет имени Аль-Фараби,

050040, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект Аль-Фараби, 71,

³Шәкәрім университет,

071410, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А

*e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com

МОДИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МХЕНЕ ПОСРЕДСТВОМ ВВЕДЕНИЯ КРЕМНИЯ (SiO₂/SiO_x/Si) РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ: РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СИНТЕЗА И АЛЬТЕРНАТИВНЫХ СТРАТЕГИЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОДИФИКАЦИИ

MXene – это перспективный класс двумерных карбидов и нитридов переходных металлов. Благодаря уникальному сочетанию таких свойств, как высокая электропроводность, большая удельная поверхность, гидрофильность и гибкость поверхностного состава, эти материалы вызывают широкий научный интерес. Такие характеристики делают MXene привлекательным для применения в системах хранения энергии, сенсорах, электрокатализе, фильтрации и очистке окружающей среды. Однако склонность к окислению и недостаточная долговременная стабильность являются важными ограничивающими факторами при их практическом использовании.

Для преодоления этих ограничений предлагаются модификации на основе кремния – в частности, использование Si, SiO₂ и SiOx – как эффективная стратегия повышения структурной стабильности MXene. В обзоре рассматриваются методы функционализации с использованием кремнийсодержащих компонентов, включая золь-гель синтез, метод Штёбера, химическое осаждение из газовой фазы (CVD), атомно-слоевое осаждение (ALD) и методы напыления.

Модификация с использованием кремния повышает устойчивость к окислению, термическую стабильность, площадь поверхности и совместимость с композитами. Эти улучшенные свойства усиливают эффективность кремний-модифицированных MXene в литий- и алюминий-ионных аккумуляторах, суперконденсаторах, сенсорах и катализаторах. Кроме того, их фотокаталитические и адсорбционные способности позволяют использовать такие материалы в экологически значимых технологиях. Обзор также рассматривает устойчивые и масштабируемые методы интеграции MXene в multifunctional системы будущего.

Ключевые слова: MXene, диоксид кремния (SiO₂), поверхностная модификация, хранение энергии, очистка воды, фотокатализ.

M. Alipuly^{1*}, K. Askaruly¹, K. Toshtay², N.N. Nurgaliyev³, S. Azat¹

¹Satbayev Univeristy,

050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Satbayev street

²Al-Farabi Kazakh national university,

050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi avenue, 71,

³Shakarim University,

071410, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka street

*e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com

MODIFICATION OF MXENE-BASED MATERIALS THROUGH THE INTRODUCTION OF SILICON (SiO₂/SiOx/Si) BY VARIOUS METHODS: DEVELOPMENT OF SYNTHESIS TECHNIQUES AND ALTERNATIVE SURFACE MODIFICATION STRATEGIES

MXene represents a promising class of two-dimensional carbides and nitrides of transition metals. Due to their unique combination of high electrical conductivity, large specific surface area, hydrophilicity, and tunable surface chemistry, they have attracted significant scientific interest. These properties enable the application of MXenes in energy storage systems, sensors, electrocatalysis, filtration, and environmental remediation. However, their susceptibility to oxidation and insufficient long-term stability remain major challenges for practical use.

To address these limitations, silicon-based modifications – specifically involving Si, SiO₂, and SiOx – are proposed as effective strategies for enhancing the structural stability of MXenes. This review analyzes functionalization methods employing silicon-containing components, including sol –gel synthesis, the Stöber method, chemical vapor deposition (CVD), atomic layer deposition (ALD), and sputtering techniques.

Silicon modification improves oxidation resistance, thermal stability, surface area, and compatibility with composites. These enhanced properties contribute to improved performance of silicon-modified MXenes in lithium- and aluminum-ion batteries, supercapacitors, sensors, and catalysts. Additionally, their photocatalytic activity and pollutant adsorption capabilities support applications in environmental protection technologies. The review also explores sustainable and scalable strategies for integrating MXenes into future multifunctional systems.

Key words: MXene, silicon dioxide (SiO₂), surface modification, energy storage, water purification, photocatalysis.

Авторлар туралы мәліметтер:

Мұхтар Әліпұлы* – «Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасының докторанты, Satbayev Univeristy, Қазақстан Республикасы; e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6265-6238>.

Қыдыр Асқарұлы – техникалық ғылымдар докторы, қауымдастырылған профессор, «Жалпы физика» кафедрасы, Satbayev Univeristy, Қазақстан Республикасы; e-mail: k.askaruly@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8998-0409>.

Қайнаубек Тоштай – доцент, «Физикалық химия, катализ және мұнай химиясы» кафедрасы, Өл-Фараби Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kainaubek.toshtay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1182-7460>.

Нұржан Нұрлыбекұлы Нұрғалиев – PhD, Шәкәрім Университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: n.nurgaliyev@semgu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Сейтхан Азат - Профессор, Инженерлі бейімді зертхана жетекшісі, Satbayev Univeristy, Қазақстан Республикасы; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>.

Сведения об авторах

Мұхтар Әліпұлы* – докторант кафедрасы «Материаловедение, нанотехнологии и инженерная физика», Satbayev Univeristy, Республика Казахстан; e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6265-6238>.

Қыдыр Асқарұлы – доктор технических наук, Ассоциированный профессор кафедрасы «Общая физика», Satbayev Univeristy, Республика Казахстан; e-mail: k.askaruly@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8998-0409>.

Қайнаубек Тоштай – доцент, кафедра «Физическая химия, катализ и нефтехимия», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Республика Казахстан; e-mail: kainaubek.toshtay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1182-7460>.

Нұржан Нұрлыбекұлы Нұрғалиев – PhD, Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: n.nurgaliyev@semgu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Сейтхан Азат – Профессор, заведующий Лаборатории Инженерного Профиля, Satbayev Univeristy, Республика Казахстан; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>.

Information about the authors

Mukhtar Alipuly* – doctoral student of the department «Materials science, nanotechnology and engineering physics», Satbayev Univeristy, Republic of Kazakhstan; e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6265-6238>.

Kydyr Askaruly – PhD technical sciences, Associate professor of the department of «General physics», Satbayev Univeristy, Republic of Kazakhstan; e-mail: k.askaruly@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8998-0409>.

Kainaubek Toshtay – Associate Professor, Department of Physical Chemistry, Catalysis and Petrochemistry, Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kainaubek.toshtay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1182-7460>.

Nurzhan Nurgaliyev – PhD, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: n.nurgaliyev@semgu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Seitkhan Azat – Professor, Head of the Laboratory of Engineering Profile, Satbayev Univeristy, Republic of Kazakhstan; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>.

Редакцияға енуі 16.06.2025

Өңдеуден кейін түсуі 08.09.2025

Жариялауға қабылданды 10.09.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-71](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-71)

FTAXP: 65.13.13



М.Т. Мурсалыкова*, **М.М. Какимов²**, **А.Л. Касенов²**, **Г.А. Кокаева²**, **Б.М. Искаков²**

¹Шәкәрім университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20 А

²С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,

010000, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Жеңіс даңғылы, 62

*e-mail: maigul_85@mail.ru

ӨСІМДІК МАЙЫН АЛУ МАҚСАТЫНДА МАҚСАРЫ ДӘНДЕРІН ҚАЙТА ӨНДЕУ

Аңдатпа: Бұл мақалада май өнеркәсібінің шағын кәсіпорындарында мақсары дәнін өңдеуге арналған технологиялық желі ұсынылды, онда өңдеудің заманауи физикалық әдістерін қолдана отырып, прогрессивті процестерді жүзеге асыратын тиімділігі жоғары жабдықтар пайдаланылды.