

МХене синтезіндегі заманауи жетістіктер: катализ және тұрақты энергия сақтау саласындағы қолданылуы

Сейтхан Азат¹, Жадыра Асенгали¹, Инабат Сапаргали¹, Қайнаубек Тоштай^{2*}

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан; s.azat@satbayev.university, sapargali.i@mail.ru, zhadyraassengali@gmail.com

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; kainaubek.toshtay@kaznu.kz

*Корреспонденция: kainaubek.toshtay@kaznu.kz

Дәйексөз: Азат, С., Асенгали, Ж., Сапаргали, И., Тоштай, Қ. (2026). МХене синтезіндегі заманауи жетістіктер: катализ және тұрақты энергия сақтау саласындағы қолданылуы. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География сериясы, 155(2), 68-102.

<https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-68-102>

Академиялық редакторлар:
Э.Е. Копишев,
С.С. Досмағамбетова

Редакцияға түсті: 20.02.2026

Түзетілді: 17.07.2026

Қабылданды: 20.07.2026

Басылымға шықты:

31.07.2026



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Аңдатпа. Екіөлшемді (2D) МХене материалдар- ауыспалы металдардың карбидтері, нитридтері және карбонитридтерінен тұратын, соңғы жылдары қарқынды дамып келе жатқан функционалдық материалдар класы. МАХ-фазалардан селективті химиялық жою арқылы алынатын МХендер жоғары электрөткізгіштік, реттелетін беткі химия, гидрофильділік және қабатты архитектура сияқты бірегей қасиеттер кешенімен ерекшеленеді. Бұл сипаттамалар МХендерді графен мен ауыспалы металдар сияқты дәстүрлі 2D материалдармен салыстырғанда энергия тасымалы мен беткі өзара әрекеттесуді қажет ететін қолданбалар үшін аса тартымды етеді. Осы шолу мақалада МХене синтездеудегі соңғы жетістіктер қарастырылады, дәстүрлі әдістермен қатар, әсіресе фторсыз және фторы аз маршруттарға, соның ішінде электрохимиялық әдіс және еріген тұздармен өңдеу синтез әдістеріне басымдық беріледі. Бұл тәсілдердің беттік функционалдық топтардың табиғатына, құрылымдық тұрақтылыққа және материал қасиеттеріне әсері жүйелі түрде талданады. Сонымен қатар, деламация, гетероатомдармен легирлеу және гибридтеу стратегиялары МХендердің функционалдық тиімділігін арттырудың негізгі жолдары ретінде талқыланады. МХендердің катализ, энергияны сақтау және түрлендіру салаларындағы кеңейіп келе жатқан қолданбалары құрылым-қасиет-тиімділік байланыстары тұрғысынан қарастырылады. Энергия сақтау құрылғыларында МХене материалдары литий-ионды және мырыш-ионды батареялар мен суперконденсаторларда жоғары сыйымдылық, ұзақ циклдық тұрақтылық және иондардың жылдам тасымалын қамтамасыз етеді. МХене және олардың гибридтік туындылары фотокатализ, электркатализ және көмірқышқыл газын (CO₂) гидрлеу жүйелерінде жоғары тиімділік, тұрақтылық және икемділікті қамтамасыз ететін перспективалы материалдар болып табылады. Бұл шолу МХендерді ұтымды жобалауға арналған біртұтас ғылыми негіз қалыптастырып, орнықты әрі қолданбалы МХене-негізіндегі технологияларды дамытуға бағытталған болашақ зерттеулерге жол ашады.

Түйін сөздер: МАХ фаза; Мхене; синтез әдістері; катализ; энергия сақтау

1. Кіріспе

Жетілдірілген функционалдық материалдардың қарқынды дамуы энергияның тұрақтылығын қамтамасыз ету, қоршаған ортаны қорғау және химиялық түрлену үдерістерінің тиімділігін арттыру сияқты мәселелерді шешуде маңызды рөл атқарады. Перспективалы материалдық платформалардың ішінде екіөлшемді (2D) материалдар жоғары бет/көлем қатынасы, электрондық құрылымының реттелгіштігі және бірегей беттік қасиеттері арқасында ерекше назарға ие болды. Графен мен ауыспалы металдардың дихалькогенидтері бастапқы зерттеулерде жетекші орын алғанымен, олардың ішкі шектеулері атап айтқанда, электрондық тыйым салынған аймақтың болмауы немесе электрөткізгіштіктің салыстырмалы түрде төмендігі, баламалы 2D жүйелерді іздеуге түрткі болды. Осы тұрғыда ауыспалы металдардың карбидтері, нитридтері және карбонитридтерінен тұратын 2D материалдар тобы MXene, жоғары әмбебаптығымен және қарқынды дамуымен ерекшеленетін жаңа буын материалдары ретінде қалыптасты (Ahmed, Anjum, Gogotsi, & Alshareef, 2017; Urbankowski et al., 2016; Er, Shenoy, & Barsoum, 2023).

MXene алғаш рет 2011 жылы Ti_3AlC_2 MAX фазаларынан алюминий қабаттарын селективті түрде (etching) алу нәтижесінде, $Ti_2C_2T_x$ наноқабатшалары түрінде синтезделді (Alhabeb et al., 2017). Осы іргелі жаңалықтан кейін, оған қатысты зерттеулер қарқынды түрде дамып, эксперименттік жолмен алынған ондаған құрамдар және теориялық тұрғыда болжанған одан да көп құрылымдар ұсынылды. Көптеген дәстүрлі 2D материалдармен салыстырғанда, MXene металл тәрізді жоғары электрөткізгіштік, гидрофильді беттер, механикалық беріктік және химиялық тұрғыдан белсенді интерфейстер сияқты сирек кездесетін қасиеттер кешенін көрсетеді (Zhao, Que, Chen, & Yang, 2020). Бұл ерекшеліктер MXендерді тиімді заряд тасымалын және берік беткі өзара әрекеттесуді талап ететін қолданбалар үшін, айрықша тартымды материалдарға айналдырады (Sahith et al., 2025).

MXene ауыспалы металдардың карбидтері, нитридтері немесе карбонитридтерінен тұрады. Құрылымдық тұрғыдан, MXene әдетте $M_{n+1}X_nT_x$ жалпы формуласы арқылы беріледі, мұндағы М - бастапқы ауыспалы металл, Х - көміртек немесе азот, ал T_x -синтез барысында енгізілетін –ОН, –О және –F сияқты беттік функционалдық топтарын білдіреді. n мәні көбіне 1-ден 3-ке дейін өзгеріп, құрылымдық конфигурациялардың кең ауқымын қалыптастырады, ал –Cl немесе –S топтары пассивті қалдықтар емес, керісінше MXендердің электрондық құрылымына, беткі белсенділігіне, қабатаралық қашықтыққа және қоршаған орта тұрақтылығына шешуші әсер ететін маңызды құрамдас бөліктер болып табылады (Kang et al., 2017; Ding et al., 2017). MXендер үшөлшемді (3D) прекурсорлық материалдар-MAX фазаларынан ($M_{n+1}AX_n$) синтезделеді, мұнда А атомдары IIIA немесе IVA топтарына жататын элементтер болып табылады. Бұл синтез стратегиясының негізінде MAX фазаларындағы әртүрлі химиялық байланыстардың беріктік айырмашылығы жатыр: атап айтқанда, М-А байланыстары М-Х байланыстарына қарағанда термодинамикалық және химиялық тұрғыдан әлсіз болып келеді. Осы айырмашылықты пайдалана отырып, қышқылдық немесе басқа да белсенді реагенттер көмегімен А қабаты селективті түрде алынып тасталады. Нәтижесінде ауыспалы металл мен көміртек/азот атомдарынан тұратын М-Х қаңқасы бұзылмай сақталып, 2D MXene құрылымы түзіледі, бұл материалдың бірегей физика-химиялық қасиеттерінің қалыптасуына негіз болады (Rana, Raza, Anwar, & Nazar, 2025; Elsa et al., 2025). Сондықтан MXene статикалық 2D кристаллдар ретінде қарастыруға болмайды; олар химиялық тұрғыдан бағдарланатын материалдар болып табылады. Олардың қасиеттері синтез және қосымша өңдеу шарттарын ақылмен басқару арқылы бапталуы мүмкін.

MXендерді синтездеудегі соңғы жетістіктер бұл материалдардың құрамдық әртүрлілігін, құрылымдық реттелгіштігін және функционалдық тиімділігін едәуір кеңейтті. Дәстүрлі синтез тәсілдері MAX фазаларынан А-қабат элементтерін селективті түрде алып тастау үшін фторсутек қышқылына (HF) негізделген үдеріске сүйенеді. Алайда, жоғары тиімділігіне қарамастан, HF қолданылатын әдістер қауіпсіздік, қоршаған ортаға әсері және өндірістік

ауқымда жүзеге асыру мүмкіндігі тұрғысынан елеулі мәселелер туындатады. Осыған байланысты соңғы жылдары балама стратегияларды әзірлеуге бағытталған зерттеулер қарқынды дамуда, олардың қатарына HF-тің *in situ* түзілуі, балқытылған тұздармен жою, электрохимиялық әдістер, сондай-ақ фторсыз немесе фторы аз маршруттар жатады. Бұл жаңа тәсілдер қауіпті химиялық реагенттерді пайдалануды азайтып қана қоймай, беттік химиясын және ақаулардың түзілуін дәлірек басқаруға мүмкіндік береді, сол арқылы қолданысқа бейімделген МХендерді жобалауға жаңа мүмкіндіктер ашады (Li et al., 2017; Naguib et al., 2011; Zhang et al., 2017).

МХене-дердің әлеуетін ашуда деламация және құрылымдық инженерия саласында айтарлықтай ілгерілеу байқалды. Интеркаляцияға негізделген эксфолиация бірқабатты және азқабатты МХене наноқабаттарын жоғары беттік аудан мен қолжетімді белсенді орталықтарымен алуға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, ақауларды инженериялау, гетероатомдармен легирлеу және металдар, оксидтер немесе көміртек материалдарымен гибридтеу электрондық қасиеттерді реттеу және функционалдық тиімділікті арттыруға бағытталған (Antony Jose et al., 2025; Liu et al., 2021; Younis et al., 2025). Осы жетістіктер МХене-дерді зертханалық қызығушылық нысанынан күрделі химиялық және электрохимиялық үдерістерді шешуге қабілетті инженерлік платформалар деңгейіне көтерді.

МХендердің қолдану аясының кеңеюі әсіресе катализ, энергетика және экологиялық технологияларда айқын көрінеді. Каталитикалық жүйелерде олар белсенді катализатор, тасымалдағыш және электрондық промотор ретінде сутек бөлінуі, оттек реакциялары, CO₂ түрленуі және көмірсутектер риформингінде жоғары тиімділік көрсетеді. Реттелетін беттік функциялары мен жоғары электрөткізгіштігі адсорбция энергиясы мен реакция жолдарын басқаруға мүмкіндік береді, ал металл–тасымалдағыш өзара әрекеттесуі дара атомдар мен ультрақысқа кластерлерді тұрақтандырады. Осыған байланысты МХендер гетерогенді катализде дәстүрлі тіректерге тиімді балама болып саналады (Mussa, Askaruly, Bexeitova, Azat, & Toshtay, 2025; Pandit et al., 2025; Sidorowicz et al., 2025).

Энергияны сақтау және түрлендіру саласында МХендер әртүрлі ионды аккумуляторларда, суперконденсаторлар мен гибридті құрылғыларда жоғары тиімділік көрсетуде. Қабатты құрылымы иондардың жылдам диффузиясын қамтамасыз етіп, жоғары электрөткізгіштік ішкі кедергіні төмендетеді. Сонымен қатар, беттік химия мен қабатаралық қашықтықты басқару сыйымдылықты, жылдамдықты және циклдік тұрақтылықты арттырады. Бұл МХендерді жоғары өнімді әрі сенімді жаңа буын энергетикалық материалдар қатарына қосады (Jussambayev et al., 2025; Mendhe et al., 2026; Mehrpooya, Eivari, Ganjali, & Lee, 2026).

МХендер экологиялық технологиялар саласында да, соның ішінде суды тазалау, ауыр металдарды адсорбциялау, газдарды бөлу және электромагниттік кедергілерден қорғау бағыттарында артып келе жатқан қызығушылыққа ие. МХен беттерінің металл иондары мен органикалық ластағыштарға жоғары бейімділігі, олардың құрылымдық реттелгіштігімен үйлескенде, тиімді әрі селективті тазалау үдерістерін жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, олардың электрөткізгіштігі мен тотығу-тотықсыздану белсенділігі электрохимиялық су тазалау және ластағыштарды ыдырату үдерістерінде табысты пайдаланылып, МХендердің экологиялық қоршаған ортаны қалпына келтіруде, көпфункционалды табиғатын айқындайды (Dhas, Pansare, & Katariya, 2026; Ding et al., 2025).

Осы елеулі жетістіктерге қарамастан, МХендердің кең ауқымда қолданылуын шектейтін бірқатар мәселелер әлі де сақталуда. Негізгі мәселелердің бірі - олардың әсіресе атмосфералық немесе сулы орта жағдайларында тотығуға және құрылымдық деградацияға бейімділігі. Сонымен қатар, синтездің стандартталған протоколдарының болмауы және беттік функционалдық топтарының бірізді емес сипатталуы әртүрлі зерттеулер арасындағы нәтижелерді салыстыруды қиындатып, әмбебап «құрылым–қасиет» байланыстарын қалыптастыруға кедергі келтіреді. Бұған қоса, соңғы жұмыстардың көпшілігі жаңа синтез маршруттары мен қолданбаларға басымдық бергенімен, синтез химиясы мен функционалдық

тиімділік арасындағы байланыстарды түсіндіретін біртұтас механизмдік түсінік әлі де жеткілікті деңгейде дамымаған.

Осы саладағы зерттеулердің қарқынды дамуын ескере отырып, МХендерді синтездеу мен қолданудағы соңғы жетістіктерге жаңартылған әрі сыни тұрғыдан бағаланған шолу жасау аса өзекті болып табылады. Әсіресе сипаттамалық қорытындылармен шектелмей, синтез стратегиялары, беткі химия және каталитикалық, энергетикалық әрі экологиялық жүйелердегі тиімділік арасындағы өзара байланыстарды терең талдайтын шолуларға сұраныс артып келеді.

Осы шолуда біз МХендерді синтездеудегі соңғы жетістіктерді жан-жақты қарастырып, балама жою стратегияларына, фторсыз маршруттарға және құрылымдық инженерия тәсілдеріне ерекше назар аударылады. Сонымен қатар, бұл дамулардың беттік химияға, электрондық құрылымға және материал тұрақтылығына әсерін талданады. Бұдан бөлек, МХендердің катализ, энергияны сақтау және түрлендіру, сондай-ақ экологиялық технологиялар салаларындағы кеңейіп келе жатқан қолданбаларын негізгі тиімділік сипаттамалары мен шешілмеген мәселелерді атап көрсете отырып талқылаймыз. Синтез, құрылым және функционалдық қасиеттер арасындағы өзара тәуелділікті айқындау арқылы, бұл шолу МХендерді ұтымды жобалауға арналған біртұтас негіз қалыптастыруды және болашақ зерттеулерді ауқымды әрі орнықты МХенге негізделген технологиялар бағытына бағдарлауды мақсат етеді.

2. МАХ фаза және МХендердің кристалдық құрылымы мен химиясы

МАХ-фазалар класын сипаттайтын жалпылама құрылымдық формуланы $M_{n+1}AX_n$ ретінде тұжырымдады. Мұнда n мәні 1-ден 3-ке дейін өзгеріп, материалдың стехиометриялық және кристаллохимиялық ерекшеліктерін анықтайды. Аталған параметрге сәйкес МАХ-фазалар 211 ($n=1$), 312 ($n=2$) және 413 ($n=3$) типті жүйелерге жіктеледі (Barsoum, 2000). Бұл жіктеу қабаттардың қайталану реттілігін көрсетіп қана қоймай, олардың құрылымдық анизотропиясы мен қасиеттерінің қалыптасуында шешуші рөл атқарады. МАХ-фазалардың M компоненті периодтық жүйенің ауыспалы металдары қатарынан таңдалады және негізінен 3-топ (Sc), 4-топ (Ti, Zr, Hf), 5-топ (V, Nb, Ta) және 6-топ (Cr, Mo) элементтерін қамтиды. Бұл металдар МАХ-фазаларға жоғары балқу температурасы, механикалық төзімділік және жақсы электрлік әрі жылулық өткізгіштік сияқты металдық қасиеттер береді. A элементі периодтық жүйенің 12-16 топтарына жататын p -блок элементтері ұсынылады (Al, Ga, In, Si, Ge, Sn, P, As, S және т.б.). Аталған атомдар құрылымда салыстырмалы түрде әлсіз байланысқан қабаттар түзеді, бұл МАХ-фазалардың ерекше өңделгіштігін қамтамасыз етіп, селективті химиялық еріту арқылы екіөлшемді МХене материалдарын алудың теориялық және практикалық негізін қалайды. Ал X позициясын көміртектен немесе азот атомдары иеленеді. Бұл элементтер $M-X$ арасында берік ковалентті байланыстар түзіп, МАХ-фазалардың химиялық және термиялық тұрақтылығын, сондай-ақ құрылымдық тұтастығын қамтамасыз етеді. Осы кристалдық құрылымның көрнекі бейнесі 1-суретте көрсетілген.

Ғылыми дереккөздерде 340-тан астам МАХ-фаза сипатталған және бұл материалдар класының ауқымы үздіксіз кеңеюде. Қазіргі уақытта жүргізілген жүйелі эксперименттік зерттеулердің нәтижесінде $M_{n+1}AX_n$ типіне жататын 70-тен астам дербес МАХ-фаза сенімді түрде синтезделіп, олардың кристалдық құрылымы мен негізгі қасиеттері жан-жақты сипатталған (Dahlqvist, Barsoum, & Rosen, 2024; Zeng et al., 2024). Бұл материалдар тобына құрылымдық және химиялық тұрғыдан әртүрлі қосылыстар кіреді, олардың ішінде ең көп зерттелгендері ретінде Ti_2AlC , Ti_2AlN , V_2AlC , Nb_2AlC , Ti_3AlC_2 , Ti_3SiC_2 , Zr_3AlC_2 , Ti_4AlN_3 , V_4AlC_3 , Nb_4AlC_3 және Ta_4AlC_3 сияқты фазаларды атап өтуге болады. Аталған МАХ-фазалар жоғары термиялық тұрақтылық, жақсы электр және жылуөткізгіштік, сондай-ақ механикалық беріктік сияқты қасиеттердің үйлесімімен сипатталады.

Бұл МАХ-фазалардың маңызды артықшылықтарының бірі - олардың 2D МХене материалдарын алу үшін тиімді бастапқы прекурсорлар ретінде қолданылу мүмкіндігі. Соңғы жылдары жүргізілген зерттеулер көрсеткендей, жоғарыда аталған бірқатар МАХ-фазалар

селективті химиялық жою және кейінгі қабаттарды ажырату (exfoliation) үдерістері арқылы, сәтті түрде 2D құрылымдарға түрлендірілген. Нәтижесінде Ti_2AlC және Ti_2AlN фазаларынан тиісінше Ti_2C және Ti_2N , V_2AlC және Nb_2AlC қосылыстарынан V_2C және Nb_2C , ал Ti_3AlC_2 және Zr_3AlC_2 фазаларынан Ti_3C_2 және Zr_3C_2 MXene материалдары алынғаны көрсетілген (Pietzka & Schuster, 1994; Ding et al., 2023).

Сонымен қатар, n мәні жоғары МАХ-фазалар да MXene синтезі тұрғысынан ерекше қызығушылық тудырады. Мысалы, Ti_4AlN_3 , V_4AlC_3 , Nb_4AlC_3 және Ta_4AlC_3 фазалары негізінде Ti_4C_3 , V_4C_3 , Nb_4C_3 және Ta_4C_3 типті көпқабатты MXene құрылымдары табысты түрде алынған (Jeitschko, Nowotny, & Benesovsky, 1964; Etzkorn, Ade, & Hillebrecht, 2007). Жалпы алғанда, эксперименттік түрде синтезделген МАХ-фазалардың алуантүрлілігі мен олардың MXene материалдарына тиімді түрде түрлену мүмкіндігі, бұл материалдар класын қазіргі заманғы материалтанудың қарқынды дамып келе жатқан бағыттарының бірі ретінде айқындайды.

Уштік МАХ-фазаларда кездесетін элементтер

Уштік және уштіктен тыс МАХ фазаларында болатын элемент

Уштіктен тыс МАХ фазаларындағы элемент

Қатты ерітінді түзетін элемент

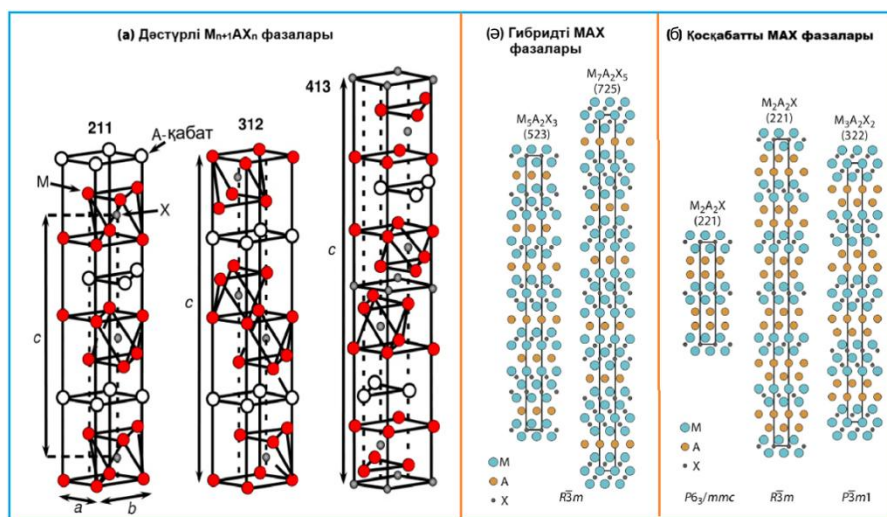
Химиялық реттелу түзетін элемент (о- немесе i-МАХ)

Сурет 1. Периодтық кесетіде МАХ-фазалар құрамындағы элементтер: М элементтері – көк, А – қызғылт сары, Х – сұр түспен белгіленген. үштік МАХ-фазаларда кездесетін элементтер қою түспен, ал жолақты түстер үштік емес МАХ-фазаларға тән элементтерді білдіреді. Күлгін шеңберлер қатты ерітінді түзетін элементтерді, ал қою көк үшбұрыштар М-, А- немесе Х-орындарындағы химиялық реттелуді көрсетеді (Dahlqvist, Barsoum, & Rosen, 2024)

МАХ-фаза - наноқабатты үшкомпонентті материалдар класына жататын, гексагональды кристалдық торға ие қосылыс болып табылады. Ол Rb_3/mmc кеңістік тобында кристалданады және құрылымында А-топ атомдарының октаэдрлік қабаттардың аралас немесе қабаттасып орналасуы типті құрылымға ие, $[M-X]$ октаэдрлері арасында кезектесіп орналасады. Аталған кристалдық архитектураның көрнекі бейнесі 2-суретте берілді. 2а-суретте көрсетілгендей, МАХ-фазалар белгілі бір стехиометриялық заңдылыққа сәйкес қалыптасатын материалдар тобы болып табылады. Мысалы, M_2AX (211) типті МАХ-фаза құрылымында екі ауыспалы металл қабаты (М), бір А-топ элементінің қабаты (А) және бір көміртек немесе азот қабаты (Х) кезектесіп орналасқан. Бұл қабатты құрылым материалдың анизотропты физика-химиялық қасиеттерінің қалыптасуына негіз болады. Ал M_4AX_3 (413) стехиометриясына ие МАХ-фазалар төрт ауыспалы металл қабатын, бір А-топ элементінің қабатын және үш көміртек немесе азот қабатын қамтиды. Осыған ұқсас түрде, n мәні жоғарылаған сайын қабаттар саны да артады. Мысалы M_5AX_4 формуласына сәйкес МАХ-фазалар бес ауыспалы металл қабатынан, бір А-топ элементінен және төрт көміртек немесе азот қабатынан тұрады.

Одан әрі, M_6AX_5 типті МАХ-фазалар алты ауыспалы металл қабатын, бір А-топ элементінің қабатын және бес Х-қабатын (С немесе N) қамтитын қайталанатын қабатты

құрылыммен сипатталады. Мұндай көпқабатты архитектурада ауыспалы металл қабаттары А-топ элементінің қабаттарымен және көміртеқ/азот қабаттарымен жүйелі түрде алмасып орналасады (Nick et al., 2021; Lin et al., 2006). Осылайша, МАХ-фазалардың қабатты кристалдық құрылымы олардың бір мезгілде металдық (электр және жылуөткізгіштік, механикалық беріктік) және керамикалық (жоғары температураға, тотығуға және химиялық әсерлерге төзімділік) қасиеттерді көрсетуіне мүмкіндік береді. Бұл ерекшелік МАХ-фазаларды заманауи материалтану, энергия сақтау және катализ салалары үшін аса перспективті функционалдық материалдар қатарына жатқызады.



Сурет 2. Әртүрлі МАХ-фазалардың кристалдық құрылымдары: а – Дәстүрлі МАХ фазалары; ә – гибриді МАХ фазалары; б – қосқабатты МАХ фазалары (Magnuson & Mattesini, 2017; Ding et al., 2025)

Өзара біріккен МАХ-фазалар – әртүрлі $M_{n+1}AX_n$ блоктарының қабаттасып өсуі нәтижесінде түзілетін күрделі кристалдық құрылымдарға ие. МАХ-материалдар жүйесіндегі күрделенген кристаллохимиялық архитектурасымен ерекшеленетін дербес бағыт ретінде қарастырылады. Бұл материалдарда бірдей емес $M_{n+1}AX_n$ құрылымдық блоктары (n мәндері әртүрлі) бір кристалдық тор ішінде ретті түрде алмасып қабаттасады, нәтижесінде қабаттардың қалыңдығы мен қайталану периодтары классикалық МАХ-фазалардан түбегейлі өзгеше болады. Осындай көпдеңгейлі қабатты құрылым 26-суретте бейнеленген. Зерттеулер гибриді МАХ-фазалардың ең жиі кездесетін конфигурациялары 523 және 725 типтері екенін көрсетеді. 523 құрылымы 211 және 312 МАХ-фазаларының бір кристалда өзара бірігуі нәтижесінде қалыптасса, 725 жүйесі 312 және 413 құрылымдық блоктарының кезектесуі арқылы түзіледі (Högberg et al., 2005).

Титан негізді жүйелер гибриді МАХ-фазалардың қалыптасуын айқын мысалмен көрсетеді. Атап айтқанда, Ti_3SiC_2 фазасымен қатар $Ti_5Si_2C_3$ және $Ti_7Si_2C_5$ тәрізді күрделі қабатты фазалардың түзілуі байқалады, олар негізгі фазаның құрылымдық жалғасы ретінде қарастырылады (Palmquist et al., 2004). Сол сияқты, Ti_2AlC материалын термиялық өндеу барысында $Ti_5Al_2C_3$ фазасының пайда болуы гибриді құрылымдардың жоғары температурада термодинамикалық тұрғыдан тұрақты бола алатынын дәлелдейді (Lane et al., 2012).

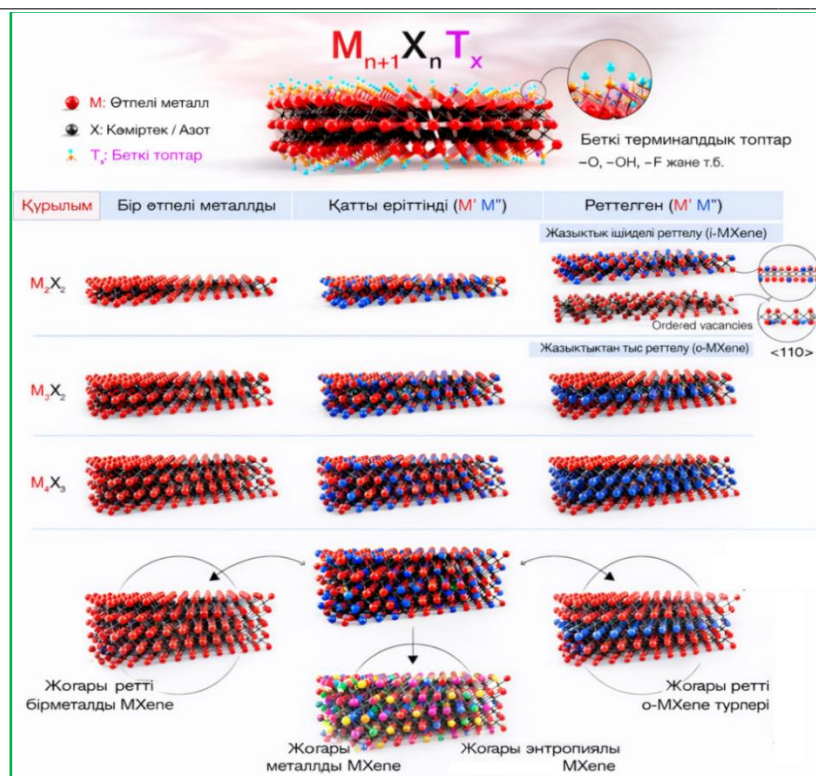
Германийлі жүйелерде де осындай құбылыстар анықталған: $Ti_{n+1}GeC_n$ жұқа қабықшаларында $Ti_5Ge_2C_3$ және $Ti_7Ge_2C_5$ фазалары түзіліп, олардың қабаттары әртүрлі қалыңдықтағы МАХ-блоктардың жүйелі түрде қабаттасуынан құралғаны көрсетілген (Högberg et al., 2005). Бұл нәтижелер гибриді МАХ-фазалардың тек көлемдік материалдарда ғана емес, сонымен қатар жұқа қабықшаларда да түзіле алатынын айқындайды.

Маңыздысы, мұндай гибриді МАХ-фазалар классикалық $M_{n+1}AX_n$ жүйелерінен симметриясының төмендеуімен ерекшеленеді. Қабаттардың әрқелкі қалыңдығы мен күрделі

қабаттасу реттілігі, олардың $R\bar{3}m$ кеңістік тобында кристалдануына алып келеді, бұл олардың физикалық және электрондық қасиеттеріне тікелей әсер етеді. Сонымен қатар, құрылымдық әртүрліліктің тағы бір мысалы ретінде қос А-қабатты МАХ-фазаларды атауға болады. Қазіргі таңда белгілі мұндай фазалардың ішінде Mo_2Ga_2C ғана $R\bar{3}m$ симметриясын сақтай отырып, төменнен-жоғары (bottom-up) синтез әдісімен алынған бірегей материал ретінде ерекшеленеді (26-сурет) (Hu et al., 2015; Lai et al., 2015). Жалпы алғанда, гибриді МАХ-фазалардың дамуы МАХ-материалдар тұжырымдамасын жаңа деңгейге көтеріп, қабатты құрылымды мақсатты басқару арқылы реттелген қасиеттерге ие жаңа функционалдық материалдарды жобалауға кең мүмкіндіктер ашады.

МХеке материалдары ауыспалы металдардың карбидтері, нитридтері және карбонитридтері қатарына жататын екіөлшемді материалдардың жаңа буынын құрайды. Бұл материалдардың бастапқы прекурсорлары МАХ-фазалар болып табылады және олар $M_{n+1}AX_n$ жалпы формуласымен сипатталады, мұнда n мәні 1, 2 немесе 3 болуы мүмкін. Аталған құрылымда А элементі периодтық жүйенің 13 немесе 14 топтарына жататын элементтермен (Al, Ga, In, Si, Ge, As, Sn, Pb және т.б.) ұсынылады, М ретінде ерте ауыспалы металдар (Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Mo, Ta және басқалары) қолданылады, ал Х позициясын көміртек немесе азот атомдары иеленеді.

МХеке материалдарының кристалдық құрылымы көп жағдайда өздерінің бастапқы прекурсоры болып табылатын МАХ-фазалардың симметриясын сақтайды және $R\bar{3}m$ кеңістік тобына жатады. Бұл симметрия гексагональды кристалдық торға тән және МХеке-дердің негізгі құрылымдық қаңқасын анықтайды. МХеке материалдарын алу МАХ-фазалардың А-қабаттарын селективті химиялық жою негізінде жүзеге асырылады (Bibi et al., 2024). Бұл үдеріс нәтижесінде қабатты құрылым сақталып, 2D М–Х қабаттары бөлініп шығады. МХеке құрылымында М–Х байланысы айқын коваленттік, металдық және иондық сипаттардың үйлесімімен ерекшеленеді, ал М–А байланысына тән металдық сипат жойылады (Chhowalla et al., 2013). Осы 2D материалдардың құрылымдық ұқсастығын ескере отырып, олар графенге ұқсас жаңа материалдар тобы ретінде «МХеке» атауын иеленді. МХеке материалдарының ($M_{n+1}X_nT_x$) құрылымдық әртүрлілігі мен атомдық реттелуінің сызбанұсқалық көрінісі 3-суретте көрсетілді. Мұнда М – ауыспалы металл, Х – көміртек немесе азот, ал T_x – беттік функционалдық топтар ($-O$, $-OH$, $-F$). Суретте бірметалды МХеке, қатты ерітінді түріндегі және реттелген көпметалды МХеке құрылымдары көрсетілген. Сонымен қатар, металл атомдарының жазықтық ішіндегі (i-МХеке) және жазықтықтан тыс (o-МХеке) реттелуі, реттелген вакансиялардың түзілуі, жоғары ретті және жоғары энтропиялы көпэлементті МХеке жүйелері бейнеленген. Бұл құрылымдық әртүрлілік МХеке материалдарының физика-химиялық қасиеттерін мақсатты түрде реттеуге мүмкіндік береді.



Сурет 3. MXene-нің кристалдық құрылымы (Gogotsi & Anasori, 2019)

Алынған MXene материалдарының жалпы формуласы $M_{n+1}X_nT_x$ түрінде жазылады, мұндағы T_x – химиялық жою кезінде М атомдарының бетіне енетін функционалдық топтарды ($-O$, $-OH$, $-F$) білдіреді. Сулы ортада жүргізілетін жою үдерісінің нәтижесінде MXene беті әрдайым гидрофильді функционалдық топтармен қапталады. Бұл ерекшелік MXene материалдарына жоғары гидрофильділік, ионалмасу қабілеті және беткі химиялық тұрақтылық береді. Беттік функционалдық топтардың болуы MXene-дердің полимерлік матрицаларда толтырғыш ретінде қолданылуына және гидроксилдік желілердің түзілуіне мүмкіндік береді, бұл иондардың тиімді тасымалдануына жағдай жасайды. Сонымен қатар, функционалдық топтар MXene-дердің басқа материалдармен химиялық және физикалық өзара әрекеттесуін жеңілдетіп, MXene-негізіндегі композиттік материалдардың кең спектрін қалыптастыруға жол ашады. Гидрофильді бет MXene ұнтақтары мен жұқа қабықшаларының тұрақтылығын және біркелкі дисперсиялануын арттырады (Anasori, Lukatskaya, & Gogotsi, 2023).

MXene бетінің функционалдық топтарға бай болуы сулы ерітінділерде сыртқы иондармен тиімді интерфейстік байланыстардың түзілуін қамтамасыз етіп, күрделі иерархиялық құрылымдарды оңай құрастыруға мүмкіндік береді. Қабатты морфология MXene материалдарын ион ион алмасу үдерістері үшін аса қолайлы етеді. Беткі топтар материалдың иондарды адсорбциялау және алмастыру қабілетін күшейтіп, оның жоғары беттік әрекеттесуі мен гидрофильділігін қамтамасыз етеді. MXene материалдарының Li^+ , Na^+ , K^+ және Mg^{2+} сияқты әртүрлі иондарды енгізу қабілеті, олардың электрохимиялық қасиеттерін айтарлықтай жақсартып, жоғары энергия тығыздығын және ұзақ циклдік тұрақтылықты қамтамасыз етеді. МАХ-фазаларды селективті жоюға негізделген бұл әдістер әртүрлі морфологияға және реттелген құрылымдық ерекшеліктерге ие MXene материалдарын алуға мүмкіндік береді (Luo et al., 2024; Pan, 2024).

3. MXene синтездеу стратегиялары

MXene материалдарын төменнен жоғары немесе жоғарыдан төмен әдістері арқылы синтездеуге болады. Сәйкес синтездеу әдісін таңдау материалдың өлшемдерін,

морфологиясын және функционалдық қасиеттерін қоса алғанда, оның химиялық және физикалық сипаттамаларын жан-жақты анықтау үшін маңызды болып табылады (Shao et al., 2020).

3.1. MXene синтездеудің классикалық әдісі

MXene қабаттарын алуда ең кеңінен қолданылатын әдіс - top-down (жоғарыдан төмен) стратегиясы болып табылады. Бұл тәсіл бастапқы MAX фазасынан басталып, қабатты А элементін қышқылдар арқылы селективті түрде жою (etching) үдерісіне негізделеді (4-сурет). MXene құрылымының өзінің үшөлшемді (3D) MAX-фазалық аналогымен ұқсастығына байланысты, бұл әдіс дәстүрлі немесе классикалық тәсіл ретінде қарастырылады (Lim et al., 2022).

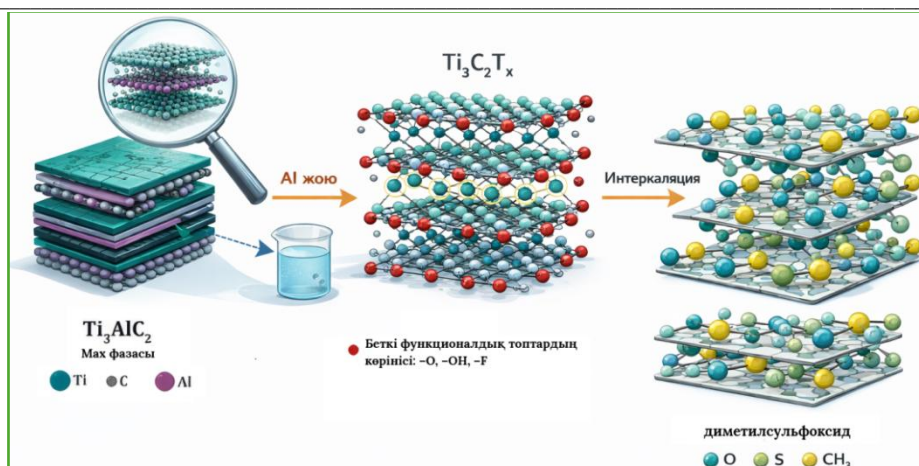


Сурет 4. MXene синтезі үшін жоғарыдан төмен қарай әдісінің сызбалық көрнісі

Үдеріс әдетте екі кезеңнен тұрады: MAX фазасының құрылымын бұзу немесе ойып бөлу, содан кейін алынған MXene қабаттарын деламинациялау. MAX фазасы М, А және Х элементтерінің таза ұнтақтарын стехиометриялық араласумен 1200–1600 °С-та өңдеу арқылы алынады (Hugosson et al., 1999). Материалдың тығыздығын арттыру үшін суық немесе ыстық нығыздау қолданылады; қысым деңгейі (25–45 МПа) түйіршіктердің өсу бағытына әсер етеді. Алайда жоғары температурада А элементі (мысалы, Al немесе Si) буланып кетуі мүмкін, сондықтан оның артық мөлшері қажет болады (Buhari et al., 2025; Salim et al., 2019). MAX фазасын алу аяқталғаннан кейін MXene синтезінің негізгі және шешуші кезеңі ретінде 3D MAX құрылымын қышқылдық ортада жою жүргізіледі. Бұл кезеңде көбінесе Ti_3AlC_2 сияқты алюминийқұрамды MAX фазалары күшті химиялық реагент, фторсутек қышқылы (HF) арқылы өңделеді. MAX фазаларының кристалдық құрылымында металл–А (М–А) байланыстарының беріктігі металл–бейметалл (М–Х) байланыстарына қарағанда төмен болғандықтан, А элементін селективті түрде жоюға қолайлы жағдай қалыптасады.

Алюминийді MAX фазасының қабатаралық құрылымынан тиімді әрі толық алып тастау үшін ерітіндіде фторид иондарының айтарлықтай жоғары концентрациясы талап етіледі. Бұл құбылыс фторид иондарының алюминий атомдарына деген жоғары химиялық бейімділігімен және тұрақты кешендер түзу қабілетімен байланысты. Осылайша, HF-пен өңдеу нәтижесінде үшөлшемді MAX фазасы біртіндеп қабатты MXene құрылымына айналады (Heidarpour, Faraji, & Haghighi, 2022; Zhou, 2012).

Сонымен қатар, қышқылмен өңдеу үдерісі тек А элементін жоюмен шектелмей, алынған MXene материалдарының беткі химиясын да айтарлықтай өзгертеді. Атап айтқанда, MXene қабаттарының бетінде оттегі пен фтор құрамды функционалдық топтар, яғни –О, –ОН және –F топтары қалыптасады. Бұл беткі аяқталулар MXene-нің гидрофильділігін арттырып, оның кейінгі интеркаляция, деламинация және әртүрлі қолданбалардағы (энергия сақтау, катализ, сенсорлар) функционалдық қасиеттеріне тікелей әсер етеді (4-сурет).

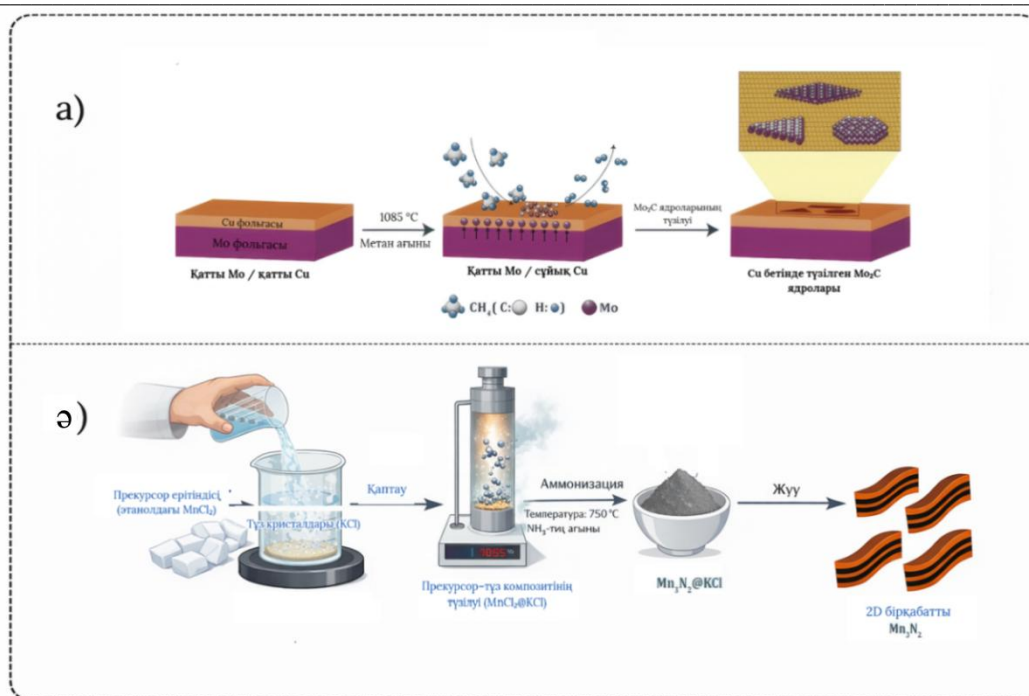


Сурет 5. Ti_3AlC_2 MAX фазасын Ti_3C_2 MXene алу мақсатында жою және интеркаляция үдерістерін сызбанұсқа сипаттамасы

Төменнен жоғары (Bottom-up) синтез әдісі атомдық деңгейде дәл басқаруға мүмкіндік беретін MXene алудың баламалы стратегиясы болып табылады және бұл бағыт жоғарыдан төмен (top-down) әдіспен салыстырғанда әлі де шектеулі деңгейде зерттелген (Salim et al., 2019). Бұл тәсілде синтез жекелеген атомдардан немесе шағын бейорганикалық және органикалық молекулалардан басталып, кейіннен реттелген кристалдану арқылы екіөлшемді (2D) қабатты құрылымдардың түзілуіне алып келеді.

Төменнен жоғары Bottom-up стратегиясында ең кең таралған әдіс-химиялық бу фазасында тұндыру болып табылады. ба-суретте көрсетілгендей, осы әдісте әртүрлі субстраттар бетінде жоғары сапалы және біркелкі жұқа қабыршақтарды өсіруге мүмкіндік береді. Алайда бұл әдіспен алынған MXene материалдары көбінесе көпқабатты сипатта болады, әдетте алты қабаттан кем болмайды.

MXene-нің бұл әдіс арқылы алғашқы синтезі барысында жоғары кристал түріне ие ультражұқа молибден карбиді (Mo_2C) алынады. Бұл үдерісте көміртек көзі ретінде метан газы (CH_4), ал субстрат ретінде мыс/молибден фольгасы қолданылып, синтез 1085°C -тан жоғары температурада жүргізіледі. Осу параметрлерін оңтайландыру арқылы, өлшемдері 10–100 мкм аралығындағы қабыршақтар алынып, олардың құрылымдық ақауларының аз және беттік функционалдық топтарының жоқ екені анықталған (Xu et al., 2015).



Сурет 6. а) Химиялық бу тәрізді отырғызу әдісін қолдану арқылы С және Мо газ камерасына енгізіліп, Mo₂C жұқа қабаты алу сызбанұсқасы. ә) Тұздар негізіндегі MoN наноқабатшалары синтездеу сызбанұсқасы

Химиялық бу фазасында тұндыру әдісінен бөлек, MXene алу үшін плазмамен күшейтілген импульстік лазерлік тұндыру және тұзды-шаблон (salt-templating) әдістері де зерттелуде (Zhang et al., 2017). Бұл әдістер арқылы 700 °C температурада ультражұқа Mo₂C қабыршақтарының қалыңдығы лазер импульстарының жиілігімен дәл реттеледі.

Соңғы зерттеулерде тұзды-шаблон әдісі арқылы гидрофильді қасиетке ие, қалыңдығы 1 нм-ден төмен 2D нитридтер (V₂N, W₂N, MoN) алынғаны көрсетілген (Buhari et al., 2025). Сонымен қатар, 66 суретте берілгендей, KCl мен Mn₃N₂ торларының сәйкестігіне негізделген әдіс арқылы бөлме температурасында магниттік қасиет көрсететін ультражұқа 2D Mn₃N₂ қабыршақтары синтезделген (Xiao et al., 2019).

3.2. Электрохимиялық өңдеу әдісі

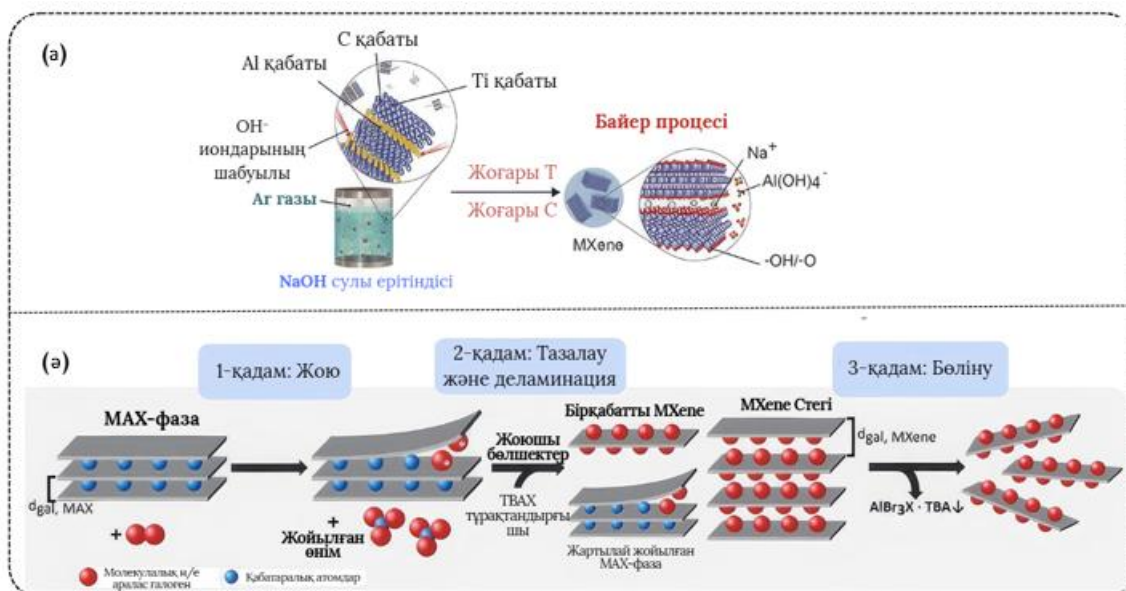
Электрохимиялық өңдеу MXene синтездеудің дәстүрлі HF-негізді әдістеріне экологиялық тұрғыдан қауіпсіз балама ретінде кеңінен танылуда. Фторидке негізделген коррозиялық реагенттермен салыстырғанда, бұл тәсіл жоғары қауіпсіздігімен, реакция кинетикасын дәл басқару мүмкіндігімен және беттік функционалдық топтарды реттеуге икемділігімен ерекшеленеді. Осы қасиеттеріне байланысты электрохимиялық өңдеу энергетикалық қолданбалар үшін аса қолайлы болып табылады (Nouseen & Pumera, 2025).

Сыртқы электр кернеуін LiOH, NH₄Cl, иондық сұйықтықтар немесе балқытылған тұздар сияқты арнайы таңдалған электролиттерде қолдану арқылы MAX фазаларындағы А-қабатты жұмсақ немесе қалыпты температура жағдайында селективті түрде жоюға болады. Бұл MXene морфологиясы мен беткі химиясын дәл баптауға мүмкіндік беріп, үлкен өлшемді, жақсы дисперсияланатын және әртүрлі топтары (–OH, –O, –Cl, –S) бар қабыршақтардың түзілуіне жағдай жасайды. Сонымен қатар, электролит құрамы беткі топтардың табиғатын анықтайтындықтан, каталитикалық белсенділікке және ион тасымалына тікелей әсер етеді (Ostermann et al., 2025).

Электрохимиялық әдістің тағы бір артықшылығы –Ti-негізді MAX фазаларымен шектелмей, V₂C, Nb₂C және Cr₂C сияқты жүйелерге де сәтті қолданылып, MXene материалдарының аясын кеңейтті (Wei et al., 2021). Фторидті реагенттердің коррозиялық HF

түзілуі және тұрақсыз –F мәселелерін болдырмау үшін фторсыз электрохимиялық әдістерге қызығушылық артты. MXene алғаш рет фторсыз сулы синтез арқылы алынып, кейін литий-ионды аккумулятор электролитін қолдану арқылы шамамен 3 нм қалыңдықтағы $Ti_3C_2T_x$ қабыршақтары алынып, сутек газының бөлінуі байқалды (Sun et al., 2019).

MAX фазасының анодтық жағындағы Al атомдары NH_4Cl және тетраметиламмоний гидроксиді электролиттерінде электрохимиялық жолмен экстракцияланып, гидроксид функционалдық топтарымен алмастырылды. Электрохимиялық тазалау екі электродты жүйеде жүзеге асады, катодта реакциялар байқалмайды. Сілтілік тазалау MXene синтезінің тиімді баламасы болып табылады: Ti_3AlC_2 фазасын 27,5 M NaOH ерітіндісінде 270 °C-та өңдеу арқылы $Ti_3C_2T_x$ MXene алынатыны және тазалығы 92 %-ға жететіні хабарланған (Li et al., 2018; 7a-сурет). Сусыз ортада галогендерді пайдалану MAX фазасынан MXene материалдарын бөлме температурасында тиімді синтездеуге мүмкіндік беретіні көрсетілген (7b-сурет) (Jawaid et al., 2021). Br_2 , I_2 , ICl және IBr галогендері Ti_3AlC_2 фазасын радикалдық механизм арқылы селективті түрде жойып тазалайды, ал үдерістің жүруі галоген мен еріткіштің концентрациясына, олардың молярлық арақатынасына және температураға тәуелді. Аталған әдіс құрамында HF бар орталармен салыстырғанда экологиялық қауіпі төмен MXene материалдарын алуға перспективалы мүмкіндік ұсынады.



Сурет 7. MXene синтезі үшін электрохимиялық әдістер сызбанұсқасы (Li et al., 2018; Jawaid et al., 2021)

3. Бифторид тұздарымен өңдеу әдісі

Бұл үдеріс кезінде бифторид тұздарынан бөлінетін гидратталған катиондар теріс зарядталған MXene бетіне адсорбцияланып, қабатаралық арақашықтықтың ұлғаюына ықпал етеді (Halim et al., 2014). Бұл әдіс ұшқыш әрі аса қауіпті HF-ке балама ретінде жұмсақ әрі қауіпсіз болып саналады. NH_4HF_2 арқылы өңделген Ti_3C_2 MXene кеңейтілген қабатаралық құрылымымен және жоғары электрохимиялық қасиеттерімен ерекшеленеді, бұл иондарды сақтау қабілетін айтарлықтай арттырады (Feng et al., 2019). Сонымен қатар, NH_4HF_2 қолдану арқылы K-MXene синтезделіп, pH реттеу үшін OH^- және NH_4^+ иондарының қатысуы жуудың санын азайтады (Feng et al., 2017). Karlsson және әріптестері Ti_3AlC_2 -ні бөлме температурасында NH_4HF_2 ерітіндісінде өңдеу арқылы $Ti_3C_2T_x$ MXene алған (Karlsson et al., 2015). NH_4HF_2 -ден басқа $NaHF_2$ және KHF_2 сияқты бифторид тұздары да Ti_3AlC_2 -ден $Ti_3C_2T_x$ алу үшін табысты қолданылған. Соңғы зерттеулерде NH_4HF_2 -нің органикалық пропиленкарбонатпен біріктірілуі тұрақты MXene дисперсиясын алуға мүмкіндік беретіні көрсетілген (Natu et al., 2020).

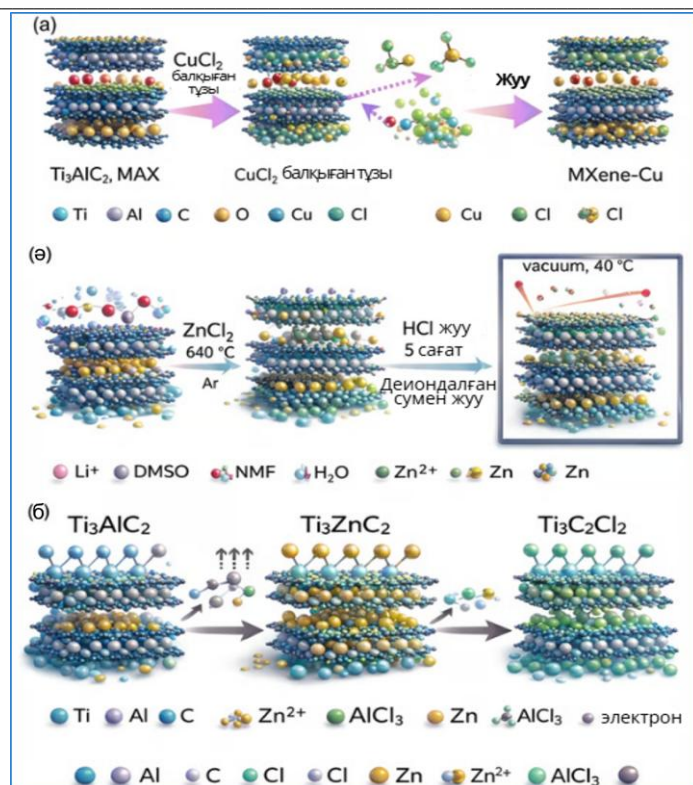
Бұл әдістің механизіміне келетін болсақ, NH_4HF_2 , NaHF_2 немесе KHF_2 сияқты бифторид тұздары қабатталған МАХ прекурсорларынан (мысалы, Ti_3AlC_2) А-қабатын (әдетте Al) селективті түрде жою үшін қолданылады, нәтижесінде беттік функционалдық топтары бар ($\text{T}_x = -\text{F}$, $-\text{O}$, $-\text{OH}$) көпқабатты МХене құрылымдары түзіледі. 8а-суретте көрсетілгендей, МАХ фазасы М–Х қабаттары мен А атомдық қабаттарының кезектесуінен тұрады, мұнда бифторид иондары қабатаралық кеңістікке еніп, А-элементпен басым түрде әрекеттесіп, ерігіш алюминий фторид кешендерін түзеді. Селективті жою үдерісі барысында 8ә-суретте бейнеленгендей, M_{n+1}X_n қабаттары біртіндеп босап, «аккордеон» тәрізді көпқабатты МХене бөлшектері қалыптасады. Кейінгі жуу және интеркаляция сатылары қабатаралық арақашықтықты одан әрі ұлғайтып, 8б-суретте көрсетілгендей, бірнеше қабатты немесе бір қабатты МХене наножапырақтарының түзілуіне мүмкіндік береді. Дәстүрлі HF -пен жою әдісімен салыстырғанда, бифторид тұздарымен жою қауіпсіздігі жоғары, реакция кинетикасын бақылауға қолайлы және МХене торының құрылымдық бұзылуын азайтады, бұл әдісті ауқымды әрі экологиялық тұрғыдан тиімді МХене синтезі үшін болашағы зор әдіс.



Сурет 8. Бифторид тұздарымен өңдеу әдісіні арқылы МХене алу сызбанұсқасы

3.4. Еріген тұздар арқылы өңдеу әдісі

Еріген тұздармен жою әдісі МХене синтезіне арналған фторсыз, редокс-бақыланатын стратегия ретінде дамыды, ол қатты күйдегі шарттарда А-қабатты дәл жоюға мүмкіндік береді және Льюис қышқылды галогенидтер (ZnCl_2 , CuCl_2) қолдану арқылы МАХ фазаларындағы Al, Si, Zn немесе Ga атомдарын селективті тотығуына мүмкіндік береді. Бұл әдіс инертті атмосферада және жоғары температурада жүргізіліп, $-\text{Cl}$, $-\text{O}$ немесе $-\text{S}$ терминалдары бар құрылымдық тұрақты МХене береді және синтез кезінде беттік функционалдылықты басқаруға мүмкіндік береді (Wang et al., 2025).



Сурет 9. Еріген тұздармен өңдеу кезінде MXene/ $Ti_3C_2T_x$ синтезінің үдерісі (а), Льюис қышқылды еріген тұз әдісі арқылы MXene синтезі (ә) және наноламинатталған MAX фазаларынан MXene өндірісінде еріген тұздар қолданылуы (б)

Қатты орта сұйық қалдықтарды азайтып, тұздарды қайта пайдалануға жол береді, сондай-ақ дәстүрлі MAX фазалары мен нитрид прекурсорларын өңдеуге мүмкіндік береді (Pang et al., 2025). Li және оның әріптестері $ZnCl_2$ немесе $CuCl_2$ еріген тұздарын қолдана отырып, Ti_3ZnC_2 , V_2ZnC , Ti_2ZnN , Ti_3SiC_2 сияқты MAX фазаларын өңдеп, фторсыз MXene синтезін көрсетті (Li et al., 2020). Сонымен қатар, $LiF/NaF/KF$ еріген тұздарын қолдану Ti_4AlN_3 -ті өңдеп, сирек $Ti_4N_3T_x$ нитрид MXene алуға мүмкіндік берді, ал Nb_2CT_x MXene үшін еріген тұздар аз оттекті беткі топтарды беріп, биоқауіпсіздікті арттырды (Arole et al., 2022). Редокс-бақыланатын үдерістер термодинамикалық тұрғыда, MAX фазалары негіз мен Льюис қышқылды тұздардың өзара әрекетін болжауға көмектеседі. Осылайша, еріген тұздармен жою фторсыз MXene синтезін жаңа деңгейге көтеріп, беттік функционалдықты дәл басқару, прекурсорларды әртараптандыру және қалдықсыз өңдеуді біріктіретін кең масштабты платформаға айналдырады (Siddique et al., 2023).

MXene алу үшін ең көп қолданылатын прекурсор – Al-MAX фазасы (Ti_3AlC_2), ол үштік MAX фазаларының тек 20 %-ын құрайды. Қалған MAX фазаларын MXene-ге айналдыру үшін жаңа әдістер қажет. Льюис қышқылдары негізіндегі балқыған тұздарды пайдалану MXene материалдарын синтездеудің жаңа мүмкіндіктерін ашып, оларды алу әдістерінің аясын кеңейтті. Мысалы, $Ti_4N_3T_x$ MXene дәстүрлі HF әдісінен өзгеше, $550^\circ C$ -де Ar атмосферасында еріген тұздармен синтезделді. Na-ион батареялары үшін $Ti_3C_2T_x$ MXene аноды, Hu және әріптестері фторсыз, еріген тұзымен жасады. MAX фазасы $NaCl/KCl$ тұзымен араласып, $700^\circ C$ -де қыздырылды, содан кейін судан және $(NH_4)_2S_2O_8$ ерітіндісінен тазаланды (Hu et al., 2023). (сурет 9(а)). Zhang және әріптестері (Zhang et al., 2024) хлор-тұйықталған MXene синтезін көрсетті: Zn^{2+} балқыған Zn-ге айналып, Al атомы $AlCl_3$ -ке айналды, MXene-де біркелкі $-Cl$ терминалды бет пайда болды және вакуумде кептірілді (сурет 9(ә)). Еріген тұзда синтездеу әдісі реакцияның жоғары жылдамдығы мен технологиялық қарапайымдылығының арқасында кеңінен танымал. MAX фазалары $ZnCl_2/NaCl/KCl$ тұздарында өңделіп, Zn-MAX

фазасы арқылы МХепе алынды (сурет 9(э)). Luo және әріптестері Со-пен модификацияланған, толық Cl-тұйықталған МХепе-ді бірқадамдық еріген тұзымен синтездеді (Luo et al., 2021).

3.5. Химиялық бу фазасында тұндыру әдісі

Химиялық бу фазасында тұндыру әдісі МХепе материалдарын экологиялық тұрғыдан таза синтездеу тәсілі ретінде қалыптасып келеді. Бұл әдіс газ тәрізді прекурсорларды қатаң бақыланатын жағдайларда пайдалана отырып, екіөлшемді кристалдарды тікелей қалыптастыруға мүмкіндік береді. Дәстүрлі тәсілдерден айырмашылығы, яғни МАХ фазаларын қышқылдармен селективті жоюға негізделген әдістерден өзгеше, бұл технология қауіпті химиялық реагенттерді толықтай айналып өтіп, жоғары тазалықтағы МХепе қабаттарын қоршаған ортаға әсері төмен әрі құрылымдық тұтастығы жоғары күйде алуға жол ашады (Rouhi et al., 2025).

Бұл әдістің негізгі принципі ұшпа прекурсорлардың жоғары температура жағдайында басқарылатын түрде ыдырауы немесе өзара әрекеттесуі арқылы МХепе кристалдарының қолайлы субстрат бетінде тікелей нуклеацияланып өсуіне негізделген. Прекурсор құрамы, тасымалдаушы газдың ағын жылдамдығы, субстраттың түрі және реакция температурасы сияқты параметрлер алынатын МХепе материалдарының морфологиясына, қабат қалыңдығына және бүйірлік өлшемдеріне айтарлықтай әсер етеді. Осындай дәл басқару мүмкіндігі үлкен меншікті беткі ауданы бар, ақау тығыздығы төмен және архитектурасы реттелетін ультражұқа қабаттарды алуға мүмкіндік береді. Маңыздысы, осы әдіс арқылы алынған МХепе материалдары көбіне беттік функционалдық топтары жоқ немесе өте аз мөлшерде терминалданған күйде түзіледі, бұл олардың құрылымын терең зерттеуге және синтезден кейінгі функционалдандыру жұмыстарын жүргізуге кең мүмкіндіктер ашады (Madni et al., 2025). Тұрақты даму тұрғысынан алғанда, бұл синтез әдісі коррозиялық реагенттерді және сұйық қалдық ағындарын қолдануды қажет етпейтіндіктен, оны экологиялық тұрғыдан қауіпсіз балама технология ретінде қарастыруға болады.

Бұл әдісте Cu және Mo фольгалары субстрат ретінде қолданылып, кварц түтікке орналастырылды (10-сурет). Cu/Mo қосқабатты құрылым сутек атмосферасында 1085 °C-тан жоғары температурада қыздырылып, көміртек көзі ретінде CH_4 енгізу арқылы екіөлшемді Mo_2C кристалдарының өсуі іске асырылды. Осы температурада Cu балқып, Mo-Cu қорытпасының түзілуі Mo атомдарының диффузиясын жеңілдетіп, беттік қабатта ультражұқа Mo_2C қабаттарының түзілуіне жағдай жасалады. Алынған кристалдар 100 мкм-ден асатын бүйірлік өлшемдерге ие болып, құрылымдық жағынан МХепе-тәрізді сипат көрсетеді (Paradopoulos et al., 2020).

Өсу уақыты мен температура Mo_2C кристалдарының қалыңдығын, нуклеация тығыздығын және бүйірлік өлшемдерін айқындайтын негізгі факторлар ретінде анықталды (Borah, Natu, Biswas, & Srivastava, 2025). Сонымен қатар, CH_4 концентрациясын реттеу арқылы кристалл морфологиясын дәл басқаруға болады: төмен мөлшерде әр деңгейде пішіні ұқсас тармақталған құрылымдар түзілсе, көміртектің аса қанығуы алтыбұрышты, бесбұрышты және тікбұрышты кристалдардың қалыптасуына әкелді. Алтыбұрышты Mo_2C фазасы орторомбалық құрылымнан айқын ерекшеленді.



Сурет 10. Химиялық бу фазасында тұндыру әдісінің сызбанұсқасы

Мыс фольгасының қалыңдығын өзгерту арқылы Mo_2C қабаттарының қалыңдығын дәл реттеу мүмкіндігі көрсетілді, бұл МХене-тәрізді материалдардың құрылымын оңтайландыруда маңызды артықшылығы болады (Geng et al., 2016). Осыған ұқсас тәсіл арқылы Wang және әріптестері Cu балку температурасынан төмен жағдайда Ti/Cu фольгасын субстрат ретінде және NH_3 газын азот көзі ретінде пайдаланып TaN жұқа қабаттарын синтездеді, ал NH_3 орнына бор ұнтағын қолдану арқылы ауыспалы метал боридтерінің түзілуін көрсетті (Wang et al., 2017). Сонымен қатар, химиялық бу фазасында тұндыру әдісі моноатомдық ReC кристалдарын синтездеуге және Cu/Mo субстратында өсірілген графеннің термиялық қайта құрылуы арқылы екіөлшемді $\alpha\text{-Mo}_2\text{C}$ қабаттарын алуға мүмкіндік берді (Deng et al., 2017). Төменде 1-кестеде МХене синтезінің негізгі әдістерінің артықшылықтары мен кемшіліктері салыстырмалы түрде берілді.

Кесте 1. МХене синтезінің негізгі әдістерінің артықшылықтары мен кемшіліктері

№	Әдіс атауы	Артықшылықтары	Кемшіліктері
1	Химиялық бу фазасында тұндыру	Жоғары кристалл сапасы, қабат қалыңдығын дәл бақылау мүмкіндігі, қоспасыз, таза материал алу, үлкен ауданға біркелкі жабын алу	Жоғары температура талап етеді, қымбат жабдық қажет, үдеріс күрделі- өндірістік масштабтау қиын
2	Еріген тұздар арқылы өңдеу	HF қолданбайды, экологиялық тұрғыдан тиімдірек, MAX фазаны тиімді өңдеу мүмкіндігі	Жоғары температура қажет, тұз қалдықтарын жою қиын, Құрылымды бақылау шектеулі
3	Бифторид тұздарымен өңдеу ($\text{LiF} + \text{HCl}$)	HF -ке қарағанда қауіпсіздеу, жұмсақ өңдеу жағдайлары, жақсы деламация	Уақыт ұзақ, қалдық иондар (Li^+ , F^-) қалуы мүмкін, Қабаттардың толық бөлінбеуі мүмкін
4	Электрохимиялық өңдеу	HF қолданбайды, үдерісті дәл басқару мүмкіндігі, экологиялық таза, жұмсақ жағдайларда жүргізіледі	Арнайы жабдық қажет, өнім шығымы кейде төмен, үдеріс баяу болуы мүмкін

4. МХене материалдарының қолданылуы

4.1. Катализ саласында қолданысы

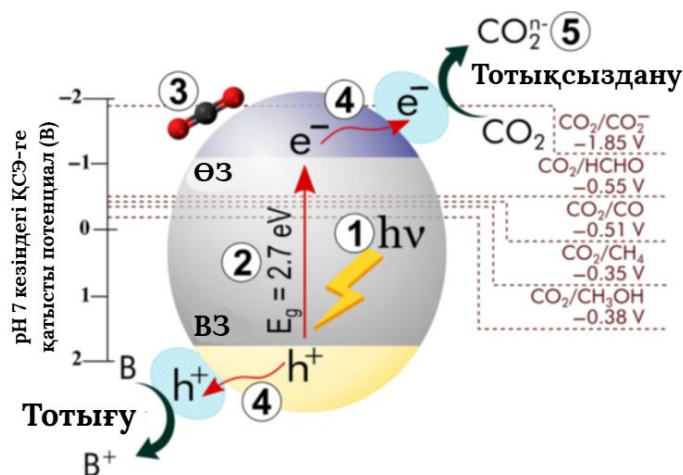
МХене-тәрізді екіөлшемді материалдар олардың жоғары беттік ауданы, металл элементтердің белсенділігі және функционалдық топтарының икемділігі арқасында катализде ерекше тиімді болып табылады. МХене құрылымындағы $-\text{OH}$, $-\text{O}$, $-\text{F}$ сияқты терминалды топтар және субстраттағы ауыспалы металдар белсенді орталықтар ретінде әрекет ете отырып, реакция кинетикасын жақсартады.

4.1.1. Көмірқышқыл газын (CO_2) тотықсыздандыру реакциясы

Көмірқышқыл газын тотықсыздандыру реакциясы (CO_2 тотықсыздандыру) - бұл CO_2 молекуласын химиялық түрде азотсыз көміртек қосылыстарына немесе отынға түрлендіру үдерісі. Бұл үдеріс қазіргі кезде климаттық өзгерістермен күрес және жасыл энергия көздерін дамыту тұрғысынан өте маңызды. CO_2 тотықсыздандыру көмірқышқыл газын CO , метанол, этанол, метан, этилен, және басқа да пайдалы химиялық қосылыстарға айналдыруға мүмкіндік береді (Aggarwal et al., 2021).

Фотокаталитикалық әдістер табиғи фотосинтез механизмін модельдей отырып, күн сәулесінің энергиясын CO_2 молекулаларын тиімді түрлендіруге қолданады (Wang et al., 2019). Металл оксидтері, нитридтер және сульфидтер CO_2 тотықсыздандыру үдерісінде белсенділік көрсеткенімен, электрон (e^- – h^+) жұптарының жылдам рекомбинациясы олардың практикалық тиімділігін шектейді (Rao et al., 2021). Бұл мәселені еңсеру үшін дәстүрлі катализаторларға асыл металдар отырғызылып, өнімділікті арттырды. Күн сәулесімен белсендірілетін МХене материалдары заряд тасымалдаушылардың тиімді бөлінуі мен бағытталған тасымалы арқасында CO_2 тотықсыздандыру фотокатализаторлары ретінде ерекше қызығушылық тудырады (Otgonbayar & Oh, 2023; Murali et al., 2022).

Фотокатализдік CO_2 тотықсыздандыру реакциясы көміртек нитрид катализаторының бетінде жүреді. Осы фотокатализдік үдеріс 11-суретте көрсетілгендей бес негізгі қадамға бөлінеді, атап айтқанда: (1) жарықты сіңіру, (2) заряд тасушыларын бөлу, (3) CO_2 адсорбциясы, (4) беттік редокс реакциясы және (5) өнімнің десорбциясы (Ng, Foo, & Ong, 2022).



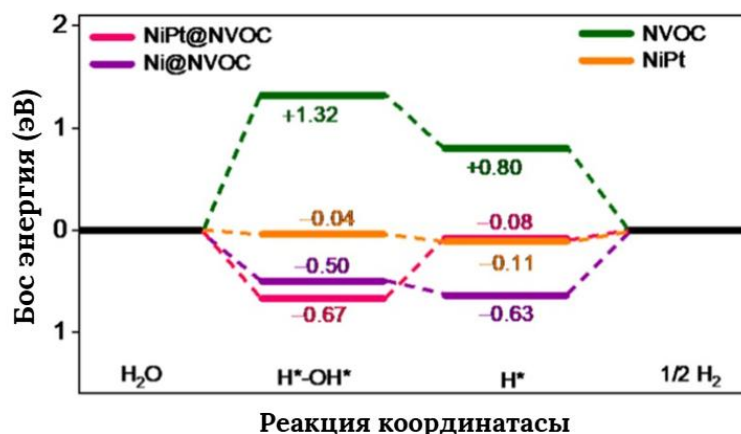
Сурет 11. Фотокатализдік CO_2 тотықсыздандыру реакция механизм сызбанұсқасы (Ng, Foo, & Ong, 2022)

4.1.2. Электрохимиялық жолмен суды айыру арқылы сутек газын өндіру

Бұл әдіс су молекулаларын (H_2O) электр тогының әсерімен сутек (H_2) және оттегі (O_2) газдарына түрлендіру үдерісі. Ол жасыл энергия көзін алудың тиімді және экологиялық таза әдісі болып табылады, себебі реакция тек су мен электр энергиясын қажет етеді және зиянды қалдық түзбейді (Pugazhendhi, Kamarudin, & Brindhadevi, 2026). Бұл үдеріс екі негізгі жартылай реакциядан тұрады: анодта оттегі эволюция реакциясы және катодта сутек эволюция

реакциясы. Анодта судан оттегі бөлініп, протондар мен электрондар түзіледі, ал катодта протондар электрондарды қабылдап, молекулалық сутек түзіледі (Raj et al., 2025). Реакцияның тиімділігі көбінесе катализатордың түріне, электрод материалдарына, электролит құрамына және қолданылатын кернеуге байланысты болады. Металл катализаторлар, мысалы платина немесе иридий негізіндегі катализаторлар, сутек эволюция реакциясы және оттегі эволюция реакциясы үшін жоғары белсенділік көрсетсе, сонымен қатар графен, метал оксидтері және нанокұрылымды катализаторлар да перспективті болып табылады (Li et al., 2025). Электрохимиялық суды айыру сутек өндірісінде қолданылатын энергияны жаңартылатын көздермен, мысалы күн немесе жел энергиясымен біріктіру арқылы толықтай жасыл сутек алуға мүмкіндік береді, бұл энергетикалық жүйелердің көміртексіз дамуына маңызды үлес қосады.

Дәстүрлі асыл металдарға негізделген катализаторлардың орнына қолжетімді, экологиялық таза баламаларды жасау саласында елеулі ілгерілеуге қол жеткізілді, бұл баламалар бәсекеге қабілетті катализдік белсенділік, жоғары беріктік және өндіріс көлемін арттыру мүмкіндігін қамтамасыз етеді. MXene туындылары негізіндегі NiV окси-карбидтік нано (NiPt@NVOC) электркатализатор ұсынылған, ол NiPt нанокұрылымдарынан тұрады, өте төмен Pt мөлшерімен (1,22 wt %) және бетінде реттелетін Pt зарядты белсенді орталықтарымен ерекшеленеді. Бұл ерекше құрылымдық және морфологиялық дизайн, оңтайландырылған электрлік конфигурациямен үйлескенде, суды диссоциациялау энергиясы кедергілерін тиімді төмендетуге және сутек өндіру үшін аралық адсорбцияны жақсартуға мүмкіндік береді, сонымен қатар теріс зарядталған Pt белсенді орталарын бетке шығаруды ынталандырады (Tran et al., 2025).



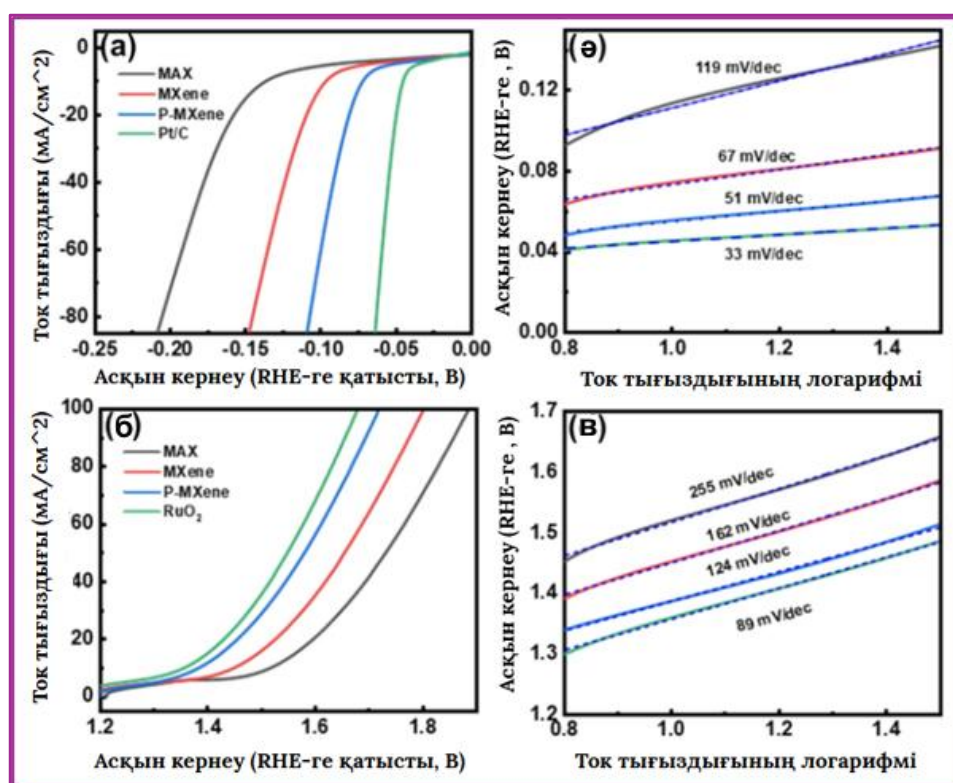
Сурет 12. Негіздік ортадағы сутек эволюциясы реакциясы үшін NiPt, NVOC, Ni@NVOC және NiPt@NVOC материалдарының Гиббс еркін энергиясының диаграммасы (Tran et al., 2025)

12-суретте суды диссоциациялау термодинамикалық тұрғыдан NVOC бетінде эндотермиялық (+1,32 эВ), ал NiPt (-0,04 эВ), Ni@NVOC (-0,50 эВ) және NiPt@NVOC (-0,67 эВ) беттерінде экзотермиялық реакция жүреді, бұл судың адсорбцияланған сутек аралықтарына диссоциациясының кинетикасы NiPt@NVOC үшін тиімді екенін көрсетеді. Сонымен қатар, NiPt@NVOC негіздік сутек эволюциясы реакциясында жоғары өнімділікті көрсетеді, бұл оның сутек аралықтарының Гиббс еркін энергиясы (ΔG_H) бойынша басқа материалдармен салыстырғанда оңтайлы екенін дәлелдейді. ΔG_{H^*} көрсеткіші қышқыл ортадағы сутек эволюция реакциясында катализатор белсенділігін бағалауда маңызды рөл атқарады, ол протонның адсорбциясын, H^+ түзілуін және H_2 десорбциясын қамтиды.

Таза MXene материалдары оттегі эволюциясы реакциясында орташа белсенділік көрсетсе де, оларды басқа материалдармен гибридтеу арқылы өнімділігін елеулі түрде арттыруға болады. Мысалы, NiFe/MXene композиттері $10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ток тығыздығында тек 270 мВ қосымша потенциалмен (η_{10}) жұмыс істей алады, бұл эталондық IrO_2 катализаторымен

салыстырғанда жоғары өнімділікті көрсетеді, себебі мұнда синергиялық электрондық әсерлер белсенді роль атқарады. NiFe қабатты қос гидроксидті (NiFe) MXene-мен біріктіру MXene материалдарының жоғары өткізгіштігін және NiFe құрамдас бөліктерінің оттегі эволюциясы реакциясының белсенділігін тиімді біріктіреді, бұл қосымша потенциалдарды төмендетуге және катализатордың беріктігін арттыруға мүмкіндік береді (Pandey et al., 2025).

Сол сияқты, $\text{WO}_3/\text{Ti}_3\text{C}_2@\text{GQD}$ гибриді катализаторы да синергиялық әсерлерге ие, мұнда MXene электрондарды тасымалдауды жақсартып, механикалық тұрақтылықты қамтамасыз етеді. Интерфейстік инженерия арқылы электрондық құрылымды реттеу зарядтардың қайта таралуын оңтайландырып, оттегі эволюциясы реакциясының белсенділігін арттырады. Бұл синергиялық әсерлер негіздік ортада катализатордың электрохимиялық тұрақтылығын және тиімділігін жақсартуға ықпал етеді (Ashraf et al., 2025).



Сурет 13. (а) MXene негізіндегі катализаторлар үшін 0,5 М H_2SO_4 ерітіндісінде 5 мВ/с жылдамдықпен жүргізілген сутек эволюциясы реакциясының сызықтық вольтамперлік қисықтары; (ә) жақсарған сутек эволюциясы реакциясының кинетикасын растайтын Тафель көлбеулігі; (б) 1,0 М КОН ерітіндісінде оттегі эволюциясы реакциясының сызықтық вольтамперлік қисықтары; (в) коммерциялық эталон катализаторлармен салыстырылған оттегі эволюциясы реакциясы үшін Тафель көлбеулігі (Pandey et al., 2025)

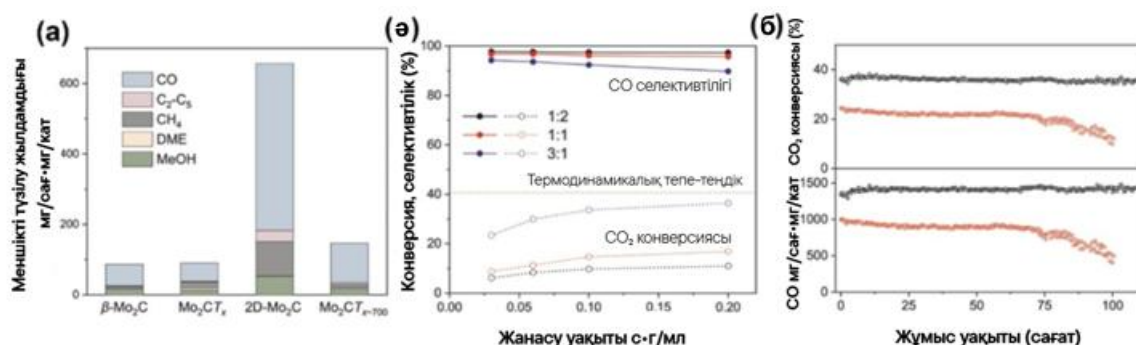
Сызықтық вольтамперлік қисықтары көрсеткендей (13-сурет), синтезделген MXene-негізіндегі катализатор эталондық материалдармен салыстырғанда сутек эволюциясы және оттегі эволюциясы реакцияларында елеулі түрде төмен қосымша потенциалдарға ие. Атап айтқанда, сутек эволюция реакциясының басталу потенциалы оңға ығыстырылған және екі реакциядағы Тафель көлбеулігі жылдам кинетиканы көрсетеді, бұл катализатордың жоғары тиімділігін және электрондардың берік әрі жылдам тасымалдануын білдіреді. Осылайша, MXene негізіндегі гибриді катализаторлар жоғары өткізгіштік, синергиялық электрондық әсерлер, төмен қосымша потенциал және тұрақты электркатализдік қасиеттер сияқты бірқатар артықшылықтарға ие болып, негіздік орталарда сутек және оттегі эволюция реакцияларында жоғары өнімділікті қамтамасыз етеді.

4.1.3. Көмірқышқыл газын (CO_2) гидрлеу

CO_2 гидрлеу реакциясы көмірқышқыл газын, бағалы химиялық заттарға және отындарға, мысалы, метанол, метан немесе басқа көмірсутектерге айналдырудағы маңызды әдіс. Соңғы жылдары МХепе-негізді катализаторлар бұл реакция үшін ерекше тиімді материалдар ретінде танылды. Себебі олардың құрылымдық және электрондық қасиеттері ерекше. МХепе-дер - бұл 2D металл карбидтері, нитридтері және карбонитридтері (мысалы, Ti_3C_2 , Nb_2C , Mo_2C) тобы, олар жоғары электр өткізгіштікке, үлкен меншікті беткі ауданға, реттелетін беттік химиясына және мықты химиялық тұрақтылыққа ие. Осы қасиеттері оларды CO_2 -ні гидрлеу реакцияларын жүзеге асыруға тамаша платформаға айналдырады (Al-Mahayni, Yuan, & Seifitokaldani, 2025; Xu et al., 2025).

Мо-терминалды базалық жазықтықтарды пайдалана отырып, граммдық масштабта таза көпқабатты 2D- Mo_2C синтездеген. Бұл синтез әдісі $\text{Mo}_2\text{C}_x\text{T}_x$ құрамындағы T_x топтарын азайтқанда 2D құрылымның 3D- Mo_2C -ге айналуын болдырмайды (14-сурет). CO_2 гидрлеу реакциясында катализаторлық тиімділікті бағалау 25 бар қысымда және 230 °C температурада ($\text{N}_2/\text{CO}_2/\text{H}_2 = 1/1/3$) жүргізілді. $\text{Mo}_2\text{C}_x\text{T}_x$ негізінен метанол (CH_3OH), метан (CH_4) және көміртек тотығын (CO) түзеді, ал аз мөлшерде C_2 - C_5 көмірсутектері және диметил эфирі (ДМЭ) пайда болады (14а-сурет) (Zhou et al., 2021).

H_2/CO_2 қоспасына 1 сағат әсер еткеннен кейін $\text{Mo}_2\text{C}_x\text{T}_x$ өзінің бастапқы төмен CO сорбциялық қабілетін едәуір арттырды. Катализатордың CO_2 гидрлеу реакциясындағы селективтілігі мен белсенділігі беткі T_x топтарының көптігімен тығыз байланысты болатыны анықталған (14ә-сурет). Мысалы, T_x топтары көп болған жағдайда метанол дегидратацияланып, ДМЭ түзеді, ал таза 2D- Mo_2C -де ДМЭ байқалмайды.



Сурет 14. (а) $\text{Mo}_2\text{C}_x\text{T}_x$ -тің әртүрлі температураларда H_2 қатысында алдын ала өңделуі, нәтижесінде ішкі құрылымның түзілу жылдамдығы өзгерісі; (ә) 2D- Mo_2C катализаторындағы CO_2 гидрлеу реакциясы (430 °C температурада және 1 бар қысымда, әртүрлі $\text{H}_2:\text{CO}_2$ қатынастары); (б) Тұрақтылық көрсеткіштері: өнеркәсіптік Cu-ZnO-Al₂O₃ катализаторы (қызыл түс) және 2D- Mo_2C катализаторы (қара түс) (Zhou et al., 2021). с×г/мл

2D- Mo_2C катализаторы CO шығару жылдамдығы шамамен 6 г/сағ×г/кат, CO_2 гидрлеуде жоғары белсенділік көрсетіп, CO -ға ~94 % селективтілікке ие. 430 °C температурада 2D- Mo_2C стандартты β - Mo_2C катализаторымен салыстырғанда шамамен алты есе жоғары белсенділікті көрсетіп, 100 сағаттан астам үздіксіз жұмыс істейді. Сонымен қатар, CO_2 конверсиясы мен CO шығару жылдамдығы ұзақ уақыт бойы тұрақты қалады. Керісінше, өнеркәсіптік Cu-ZnO-Al₂O₃ катализаторында ZnO агрегациясы немесе Cu оксидтенуі салдарынан шамамен 50 % деградация байқалды (14б-сурет). Бұл нәтижелер 2D- Mo_2C катализаторының жоғары тұрақтылығы мен белсенділігін, сондай-ақ CO_2 гидрлеуге қолайлы екенін көрсетеді.

4.2. Энергия сақтау және түрлендіру

МХепе материалдары олардың жоғары электр өткізгіштігі, кең беткі ауданы және иондарды тиімді енгізу қабілеті арқасында энергия сақтау және түрлендіру құрылғыларында кеңінен қолданылады. Оларға мыналар жатады: (1) Li/Na/K-ионды батареялар - электрод

ретінде MXene қолдану зарядтау/разрядтау жылдамдығын арттырады және цикл тұрақтылығын жақсартады. (2) суперконденсаторлар - екіөлшемді қабаттар жоғары беткі ауданы мен ион өткізгіштігі арқасында жоғары қуат сыйымдылығын қамтамасыз етеді. (3) Zn және Al-иондық жүйелер - MXene материалдары катализдік белсенділік пен ион тасымалдауды жақсартып, энергия тығыздығын арттырады (Qi et al., 2017; Kalsoom et al., 2025; Tang, Zhou, & Shen, 2012).

4.2.1. Литий-ионды батареялар

Литий-ионды батареялар жоғары энергия тығыздығымен, ұзақ қызмет ету мерзімімен және өздігінен разрядтың төмен деңгейімен сипатталатын ең кең таралған энергия сақтау жүйелерінің бірі болып табылады. Кәдімгі литий-ионды батарея катодтан (мысалы, LiCoO_2 , LiFePO_4 немесе қабатты өткінші металл оксидтері), анодтан (көбіне графит), литий тұздары бар электролиттен және сепаратордан тұрады. Зарядтау және разрядтау барысында литий иондары электролит арқылы анод пен катод арасында қайтымды түрде орын ауыстырады, ал электрондар сыртқы тізбек арқылы қозғалып, электр энергиясын өндіреді (Qi et al., 2017). Соңғы жылдары литий-ионды батареялар үшін жетілдірілген электродтық материалдар, соның ішінде нанокұрылымды көміртек материалдары, металл оксидтері және MXene сияқты екіөлшемді материалдар үлкен ғылыми қызығушылық тудырып отыр. MXene-дер жоғары электр өткізгіштігімен, үлкен меншікті беткі ауданымен, қабатаралық арақашықтығын реттеу мүмкіндігімен және беттік функционалдық топтарының көптігімен ерекшеленеді (Kalsoom et al., 2025).

MXene-негізді литий-ионды батареялардың жоғары сыйымдылығы қабаттық құрылымның қолжетімділігі, жылдам ион диффузиясы, төмен заряд тасымал кедергісі, деламинацияланған қабаттардың белсенділігі және металлдық гибридтенуден артқан өткізгіштікпен байланысты. Сонымен қатар, олардың электрохимиялық өнімділігі беттік функционалдық топтарға тәуелді: –ОН топтары басым MXene-де сыйымдылық шектеулі болса, оттегімен терминалданған MXene-де айтарлықтай жоғары, себебі литий иондарының қозғалғыштығы жоғары (Tang, Zhou, & Shen, 2012; Mashtalir et al., 2023).

MXene анодтарының өнімділігін арттырудың тиімді тәсілі – H_2O_2 арқылы өңдеу, бұл қабатаралық арақашықтықты реттеп, бетінде TiO_2 нанокристалдарының түзілуіне мүмкіндік береді. V_2CT_x электроды Nb-негізді MXene-дермен салыстырғанда кенірек жұмыс кернеу аймағын және 1 C жылдамдықта 210 mAh g^{-1} сыйымдылық көрсетті, сондай-ақ 0–3 V (Li/Li^+) диапазонында айтарлықтай заряд сақтау қабілетін сақтады (Naguib et al., 2013). H_2O_2 арқылы өңделген Ti_2C MXene жоғары ток тығыздықтарында да қайтымды сыйымдылық пен ұзақ циклдік тұрақтылық көрсетті, бұл қабатаралық қашықтықтың ұлғаюымен байланысты (Ahmed et al., 2016). Nb_2CT_x анодтары HF немесе HCl/LiF арқылы өңдеуден кейін жоғары меншікті сыйымдылық пен ұзақ циклдік тұрақтылық көрсетті. Алдын ала Li^+ интеркаляцияланған $\text{Li-Nb}_2\text{CT}_x$ аноды 1 A g^{-1} ток тығыздығында 425 mAh g^{-1} сыйымдылықпен Ti_2CT_x және $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ материалдарынан жоғары өнімділік көрсетті, бұл MXene-негізді анодтардың литий-ионды батареялар үшін жоғары әлеуетін дәлелдейді (Zhao et al., 2019).

4.2.2. Мырыш-ионды батареялар

Мырыш-ионды батареялар литий-ионды жүйелерге балама ретінде қарқынды дамып келе жатқан энергия сақтау технологиясы болып саналады, себебі олар жоғары қауіпсіздігімен, экологиялық тазалығымен, төмен құнымен және сулы электролиттерді қолдануымен ерекшеленеді. Бұл жанғыш органикалық еріткіштерді пайдалануды болдырмайды және өрт қаупін едәуір төмендетеді. Металл мырыштың өте жоғары көлемдік сыйымдылығы ($\sim 5855 \text{ mA} \cdot \text{sa} \cdot \text{cm}^{-3}$), қолайлы тотығу-тотықсыздану потенциалы, табиғи мол қоры және химиялық тұрақтылығы оны ауқымды энергия сақтау жүйелері үшін тартымды етеді. Алайда дәстүрлі мырыш-ионды батареялар жүйелері мырыш дендриттерінің түзілуі, сутегінің бөліну реакциялары және катод материалдарының құрылымдық деградациясы

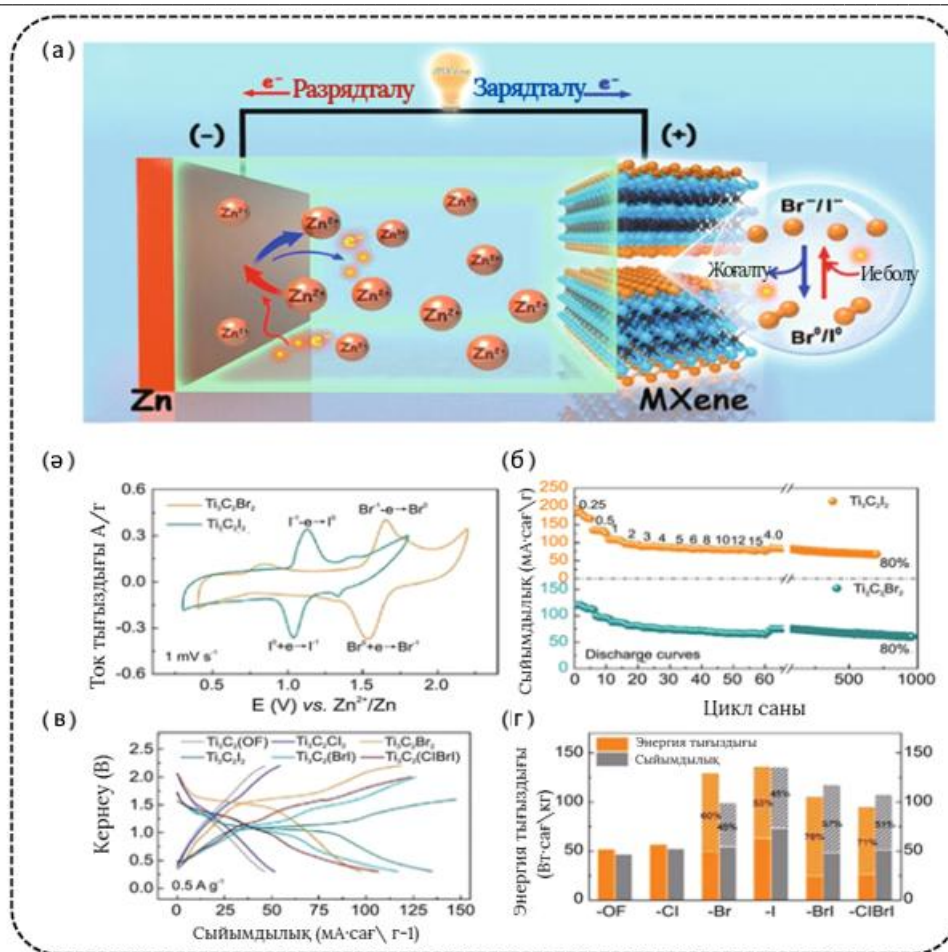
сияқты бірқатар күрделі мәселелерге тап болады, бұл олардың циклдық тұрақтылығы мен тиімділігін айтарлықтай төмендетеді (Li & Song, 2025).

Батарея жұмысы барысында Zn^{2+} иондары анод бетінде қайтымды түрде тұндырылып және қайта ерітіледі. Алайда мырыштың төмен беткі энергиясы мен ион миграциясының жоғары кедергісі Zn^{2+} иондарының біркелкі емес тұнуына алып келеді, нәтижесінде өткір дендриттер түзіліп, сепараторды тесіп өту арқылы қысқа тұйықталуға себеп болуы мүмкін. Сонымен қатар сулы электролиттерде бұл үдеріс сутегінің бөліну реакцияларымен және анодтың коррозиясымен қатар жүреді.

МХене-негізді жабындар мен интерфейстік қабаттар бұл мәселелерді бірнеше өзара байланысты механизмдер арқылы тиімді түрде азайтады. МХене бетінде орналасқан оттеққұрамды функционалдық топтар Zn^{2+} иондарын біркелкі адсорбциялап, электр өрісін тегістейді, нәтижесінде мырыштың біркелкі нуклеациясы қамтамасыз етіліп, дендриттердің түзілуі тежеледі. Сонымен қатар МХене-дердің гидрофильді беті Zn^{2+} иондарының гидратациялық қабатын әлсіретіп, десольватация энергиясын төмендетеді, бұл сутегінің бөліну реакцияларын басуға мүмкіндік береді. МХене-дердің жоғары электрөткізгіштігі электрондардың тез тасымалдануын қамтамасыз етіп, мырыштың тұну-еру кинетикасын жеделдетеді және жүйенің қайтымдылығын арттырады. Нәтижесінде МХене-мен модификацияланған мырыш анодтары мыңдаған сағат бойы тұрақты жұмыс істей алады, жоғары кулондық тиімділік пен ұзақ қызмет мерзімін көрсетеді (Liu, Chen, Shang, & Zhang, 2025).

МХене материалдары катодтардың жұмысын жақсартуға да ықпал етеді, өйткені олар белсенді интеркаляциялық материалдар үшін электрондардың өту жолдарын жақсартатын және құрылымдық тұтастықты қамтамасыз ететін жоғары өткізгіш тасымалдаушы матрица ретінде қызмет атқарады. Қабатты металл оксидтерін немесе ванадий негізіндегі қосылыстарды МХене қаңқаларымен біріктіру иондар мен электрондардың тасымалдануын күшейтіп, Zn^{2+} иондарының жылдам интеркаляциясы мен деинтеркаляциясын қамтамасыз етеді. Мысалы, $CaV_4O_9 - Ti_3C_2T_x$ композиттері МХене-нің қабатты құрылымы қалыптастыратын жоғары өткізгіштік пен иондардың жылдам диффузия желілерінің арқасында қайтымды меншікті сыйымдылықтың артуын және циклдық тұрақтылықтың жақсаруын көрсетеді (Fang et al., 2023).

15-суреттерде мырыш иондық батареяларда катод ретінде қолданылатын галогенделген МХене материалдарының электрохимиялық сипаттамасы мен өнімділігін көрсетеді. 15(а)-суретте $Zn||$ МХене батареясының зарядтау және разрядтау үдерістері кезінде жұмыс істеу принципін сызбанұсқа түрінде бейнелейді. Разрядтау кезінде анодтағы мырыш металы тотығады, Zn^{2+} иондарын және электрондарды босатады. Zn^{2+} иондары электролит арқылы МХене катодына қозғалып, МХене қабаттарына енеді, ал электрондар сыртқы тізбек арқылы өтіп, зарядтың теңгерімділігін сақтайды. Сол уақытта МХене бетінде орналасқан галогендік терминалдар (Br^-/I^-) кері қайтарылатын оксид-редокс реакцияларға түседі, яғни оксидтелген және тотыққан күй арасында айналып, Zn^{2+} интеркализациясынан тыс қосымша электрохимиялық белсенділік қосады (Li et al., 2021).



Сурет 15. (а) Мырыш иондық батареяның сызбанұсқалық бейнесі және оның электрохимиялық механизмі; (б) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Br}_2$ және $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{I}_2$ үшін циклоамперометриялық қисықтар; (в) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Br}_2$ және $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{I}_2$ материалдарының жылдамдықтық қабілеті және ұзақ мерзімді циклдық тұрақтылығы; (г) Әр түрлі терминалдары бар Ti_3C_2 MXene материалдарының гальваностатикалық заряд-разряд профилі; (д) Әр түрлі терминалдары бар Ti_3C_2 MXene материалдарының энергия тығыздығы және сыйымдылығы (Li et al., 2021)

15(а)-суретте Br және I терминалды Ti_3C_2 негізіндегі MXene материалдарының циклоамперометрия қисықтарын көрсетеді, онда галоген редокс жұптарына (Br^-/Br^0 және I^-/I^0) сәйкес анық пиктер көрінеді, бұл беттегі галогендердің электрохимиялық белсенді екенін және заряд сақтауға үлес қосатынын растайды. 15(б)-суретте панелі ұзақ мерзімді циклдық тұрақтылықты көрсетеді, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Br}_2$ және $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{I}_2$ катодтарын салыстырады. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{I}_2$ жоғары сыйымдылыққа ($\sim 200 \text{ mA} \cdot \text{сaғ} \cdot \text{г}^{-1}$) ие, бірақ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Br}_2$ -ге ($\sim 120 \text{ mA} \cdot \text{сaғ} \cdot \text{г}^{-1}$) қарағанда сәл жылдам сыйымдылық азаюын көрсетеді, бұл галоген түрінің сыйымдылық пен тұрақтылыққа елеулі әсер ететінін дәлелдейді.

15(в)-суретте әртүрлі галоген терминалы бар MXene материалдарының $0,5 \text{ A} \cdot \text{г}^{-1}$ токпен гальваностатикалық заряд-разряд профилін көрсетеді. Мұнда галогендік терминалдардың кернеу тақталарын және қолжетімді сыйымдылықты қалай өзгертетіні айқын көрінеді. Br және I терминалды MXene материалдарында Zn^{2+} интеркализациясы мен галоген редокс белсенділігінің қосарланған әсерінен кернеу тақталары айқын байқалады. 15(г)-суретте әртүрлі галогенделген MXene материалдарының энергия тығыздығы мен нақты сыйымдылығын сандық түрде көрсетеді, мұнда Br және I терминалды MXene жоғары энергия тығыздығын көрсетсе, аралас галоген терминалды материалдар (мысалы, Cl/Br, Cl/Br/I) электрохимиялық өнімділікті икемді түрде баптауға мүмкіндік береді. Барлық суреттер бірлесіп, MXene бетіне галогендік функционалық топ қосу арқылы судың ішінде жұмыс

істейтін мырыш иондық батареяларда электрохимиялық белсенділікті және энергия сақтау қабілетін арттыратынын көрсетеді, өйткені бұл үдеріс Zn^{2+} интеркализациясы мен беттегі терминалдардың редокс реакцияларының бір уақытта жүруіне мүмкіндік береді.

4.2.3. Суперконденсаторлар

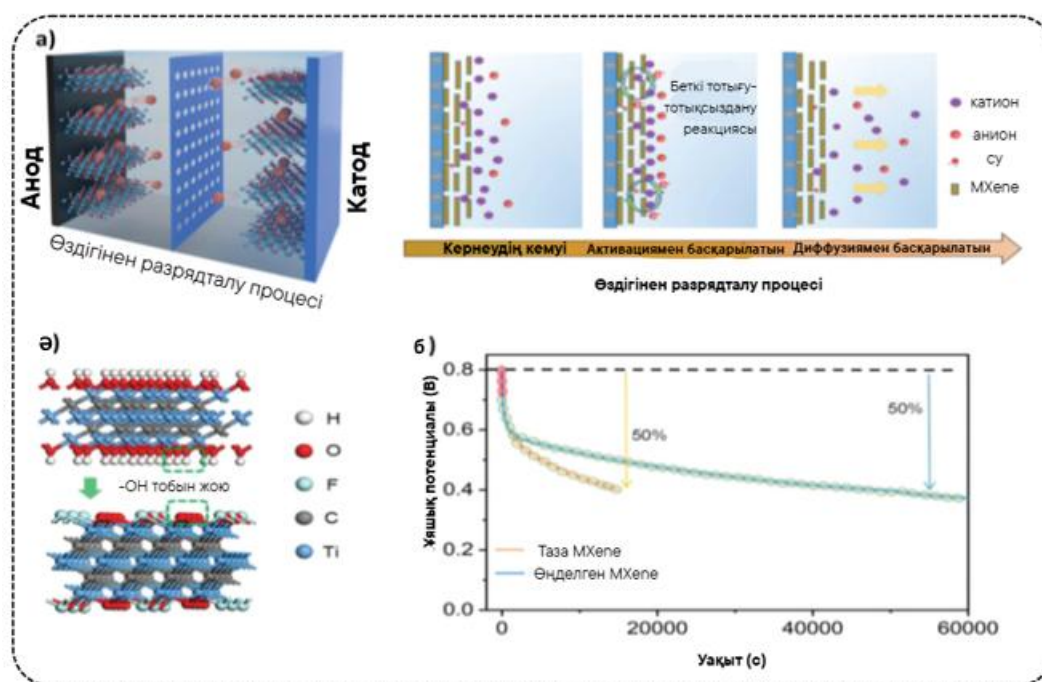
Суперконденсаторлар, немесе электрохимиялық конденсаторлар ретінде белгілі, энергияны сақтау құрылғылары болып табылады. Олардың жоғары қуат тығыздығы, жылдам зарядтау–разрядтау қабілеті және ұзақ циклдық тұрақтылығы бар, бұл оларды портативті электроника, электр көліктері және желі деңгейіндегі энергияны буферлеу сияқты қолданбалар үшін маңызды (Cowan, 2013). Батареялардан айырмашылығы, энергияны редокс реакциялары арқылы сақтамай, суперконденсаторлар негізінен электр қос қабатты сыйымдылық және кей жағдайларда псевдосыйымдылық механизмін пайдаланады, бұл электрод–электролит интерфейсінде иондардың жылдам адсорбциясы/десорбциясына мүмкіндік береді (Miller & Simon, 2008). Соңғы жылдары екі өлшемді ауыспалы метал карбидтері мен нитридтер, яғни MXene материалдары, суперконденсаторлар үшін жоғары өнімді электродтық материалдар ретінде пайда болды (Zhang, McKeown, & Pomerantseva, 2019).

Қабаттық құрылымы және айқын геометриясы арқасында MXene материалдары әртүрлі қолданбалар үшін перспективалы болып отыр. MXene негізгі ерекшеліктеріне жоғары балку температурасы, жоғары қаттылық, тотығуға төзімділік, гидрофилділік, әртүрлі енгізулерді қабылдай алу қабілеті және жылу өткізгіштік жатады. Көбінесе осындай керемет металдық өткізгіштік қасиетіне байланысты MXene материалдары жиі суперконденсаторларда қолданылады. $Ti_3C_2T_x$ MXene тез электрон тасымалдау тұрғысынан ең перспективалы таңдау болып саналады. MXene-ге металдық иондардың электрохимиялық немесе өздігінен интеркализациялануы мүмкін екені анықталған, бұл оның энергияны сақтау мүмкіндігін көрсетеді (Yaseen et al., 2021).

Зерттеушілер Ti_3C_2 MXene-ге K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ және Al^{3+} катиондары электрохимиялық жолмен интеркализацияланатынын және бұл оның сақтау сыйымдылығына әсер ететінін атап көрсеткен. Бірнеше су ерітінділері Ti_3C_2 MXene-ге қолданылып, катиондардың өздігінен интеркализациялануы іске асырылған. Ti_3C_2 электродында бұл интеркализациялар нәтижесінде шамамен $300\text{ F}\cdot\text{cm}^{-3}$ сыйымдылыққа жету байқалған. Бұл нәтижелер ғалымдарға MXene-ді суперконденсаторларда қолдануға бағытталған зерттеулерге назар аударуға мүмкіндік берді (Lukatskaya et al., 2013).

$Ti_3C_2T_x$ электрод материалы икемді суперконденсаторлар үшін жібектен жасалған көміртекті матрицаға қолданылды. Сонымен қатар, MXene материалдарының өткізгіш полимерлер немесе көміртекті наноматериалдармен композиттері әзірленіп, электрохимиялық өнімділікті арттыру үшін иондарға қолжетімді бет ауданы мен электр өткізгіш жолдарын көбейтеді (Tang et al., 2018; Bai et al., 2023). MXene құрамын және беттегі терминалды топтарын икемді өзгерту мүмкіндігі келесі ұрпақ суперконденсаторларын жобалау үшін энергия мен қуат тығыздығын арттыруға арналған кең мүмкіндіктерді ұсынады (Zhang et al., 2023).

16(а-б)-суреттерде $Ti_3C_2T_x$ MXene негізіндегі суперконденсаторлардың өзіндік разрядталу сипаттамасы мен беткі модификациясын көрсетеді. 16(а)-суретте өзіндік разряд үдерісін сызбанұсқа түрінде бейнелейді: қабатталған MXene электродтары мен олардың арасындағы катиондар, аниондар және су молекулаларының су негізіндегі электролитте интеркаляциясын көрсетеді, беттік функционалды топтардың ($-OH$, $-O$, $-F$) қатысуымен жүретін активация бақыланатын кезеңді және баяу иондардың миграциясына байланысты пайда болатын диффузия бақыланатын кезеңді ерекшелейді. Бұл MXene қабаттық құрылымы мен беткі химиясының өзіндік разрядтың кинетикасы мен көлеміне қалай әсер ететінін көрсетеді.



Сурет 16. (а) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene негізіндегі суперконденсаторларда өздігінен разрядтау үдерісінің сипаттамасы; (ә) MXene бетінің интерфейстік модуль арқылы өзгеруі нәтижесінде –ОН тобының алынуын көрсететін сызбанұсқа; (б) MXene суперконденсаторларының ашық тізбек потенциалы био-термиялық өндеуден бұрын және кейінгі жағдайлары (Pu et al., 2023)

16(ә)–суретте MXene бетінің беттік модуль арқылы өзгеруін көрсетеді, нәтижесінде –ОН топтары жойылады, бұл қажетсіз жанама реакцияларды азайтып, электрохимиялық тұрақтылықты жақсартады, сонымен қатар иондардың тасымалы мен электрондардың берілуін тиімдірек етеді. 16(б)-суретте биотермалды өндеуден бұрын және кейінгі MXene суперконденсаторларының ашық тізбек потенциалын көрсетеді: өңделмеген MXene (Pure-MX) тез разрядталып, потенциалдың 50 %-ы ерте кезеңде төмендейді, ал өңделген MXene (Treated-MX) ұзақ уақыт бойы жоғары потенциалды сақтайды. Бұл биотермалды беткі өндеудің MXene электродтарын тұрақтандыратынын, беткі қосымша реакцияларды азайтып өзіндік разрядты тежейтінін және ұзақ мерзімді энергияны сақтауды жақсартатынын растайды. Жалпы, бұл нәтижелер беттік функционализация мен интерфейстік инженерлеу MXene негізіндегі суперконденсаторлардың өзіндік разрядын бақылау және олардың өнімділігін арттыру үшін тиімді стратегиялар екенін көрсетеді (Pu et al., 2023).

5. Қорытынды

MAX-фазалар – гексагональды үшкомпонентті қабатты материалдар, жоғары термиялық тұрақтылыққа, механикалық беріктілікке және жақсы электр/жылу өткізгіштік қасиеттерге ие. Олардың қабаттық құрылымы MXene-ді алу үшін тиімді прекурсор болып табылады. MXene материалдары фторсутек қышқылымен өңдеу, бифторид тұздарын пайдалану, электрохимиялық әдістермен өңдеу, химиялық бу фазасында тұндыру (CVD) және еріген тұзда синтездеу әдістері арқылы алынады. Бұл материалдардың морфологиясын, қабат қалыңдығын және беттік функционалдық топтарын дәл басқаруға мүмкіндік береді. Нәтижесінде алынған MXene жоғары беттік ауданымен, функционалдық топтарға бай бетімен және металдық элементтердің белсенділігімен ерекшеленіп, катализ, энергия сақтау, ион алмасу және электрондық қолданбаларда перспективті болып табылады. MAX-фазалар мен MXene материалдарының синтезі мен қасиеттерін зерттеу заманауи функционалдық материалдар саласында жаңа бағыттарды дамытуға жол ашады.

6. Қосымша материалдар: қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер

Тұжырымдамалау – Ж.А; әдіснама және формальды талдау – Қ.Т; жазу - рецензиялау және редакциялау – И.С; ғылыми жетекшілік және жобаны басқару – С.А. Барлық авторлар қолжазбаның жарияланған нұсқасын оқып, мақұлдады.

8. Автор туралы ақпарат

Сейтхан, Азат – профессор, Satbayev University, Сәтбаев көшесі, 22 үй, Алматы, Қазақстан, 050060; s.azat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>

Асенгали, Жадыра – зерттеуші, магистрант студенті, Satbayev University, Сәтбаев көшесі, 22 үй, Алматы, Қазақстан, 050060; zhadyraassengali@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-7854-2251>

Сапаргали, Инабат – зерттеуші, магистр студенті, Satbayev University, Сәтбаев көшесі, 22 үй, Алматы, Қазақстан, 050060; sapargali.i@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0258-8277>

Тоштай, Қайнаубек - PhD, Физикалық химия, катализ және мұнай химиясы кафедрасының доценті; Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, 050060; kainaubek.toshtay@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1182-7460>

9. Қаржыландыру: Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қолдауымен орындалды (грант № BR24992873).

10. Алғыстар: Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қолдауымен жүзеге асырылды (грант № BR24992873). Қолдау көрсеткендері үшін алғысымызды білдіреміз.

11. Мүдделер қақтығысы: Осы зерттеу бойынша авторлар арасында мүдделер қақтығыстығы жоқ деп мәлімдейміз.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Aggarwal, M., Basu, S., Shetti, N., Nadagouda, N. M., & Aminabhavi, T. M. (2021). Photocatalytic conversion of CO₂ into valuable products using emerging two-dimensional graphene-based nanomaterials: a step towards sustainability. *Chemical Engineering Journal*, 425, 131401. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131401>
2. Ahmed, B., Anjum, D. H., Gogotsi, Y., & Alshareef, H. N. (2017). Atomic layer deposition of SnO₂ on MXene for Li-ion battery anodes. *Nano Energy*, 34, 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.02.043>
3. Ahmed, B., Anjum, D. H., Hedhili, M. N., Gogotsi, Y., & Alshareef, H. N. (2016). H₂O₂ assisted room temperature oxidation of Ti₂C MXene for Li-ion battery anodes. *Nanoscale*, 8(14), 7580–7587. <https://doi.org/10.1039/C6NR00002A>
4. Al-Mahayni, H., Yuan, R., & Seifitokaldani, A. (2025). A MXene-supported single atom catalyst selectively converts CO₂ into methanol and methane. *RSC Sustainability*, 3(4), 1729–1740. <https://doi.org/10.1039/D4SU00747F>
5. Alhabeb, M., Maleski, K., Anasori, B., Lelyukh, P., Clark, L., Sin, S., & Gogotsi, Y. (2017). Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide (Ti₃C₂T_x MXene). *Chemistry of Materials*, 29(18), 7633–7644. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b02847>
6. Anasori, B., Lukatskaya, M. R., & Gogotsi, Y. (2023). 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage. In *MXenes* (pp. 677–722). Jenny Stanford Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781003306511>

7. Antony Jose, S., Price, J., Lopez, J., Perez-Perez, E., & Menezes, P. L. (2025). Advances in MXene materials: fabrication, properties, and applications. *Materials*, 18(21), 4894. <https://doi.org/10.3390/ma18214894>
8. Arole, K., Blivin, J. W., Bruce, A. M., Athavale, S., Echols, I. J., Cao, H., Tan, Z., Radovic, M., Lutkenhaus, J. L., & Green, M. J. (2022). Exfoliation, delamination, and oxidation stability of molten salt etched Nb₂C Tz MXene nanosheets. *Chemical Communications*, 58(73), 10202–10205. <https://doi.org/10.1039/D2CC02237K>
9. Ashraf, M., Umar, E., Sunny, M. A., Iqbal, M. W., Almutairi, B. S., Ismayilova, N. A., & Khan, J. A. (2025). WO₃/Ti₃C₂@GQD composites: advanced materials for superior energy storage and hydrogen evolution performance. *The European Physical Journal Plus*, 140, 120. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-025-06052-2>
10. Bai, W., Yong, Zh., Wang, Sh., Wang, X., Li, Ch., Pan, F., Liang, D., Cui, Y., & Wang, Zh. (2023). Polyaniline-MXene composite electrode with excellent electrochemical properties for all-solid flexible supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 71, 108053. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108053>
11. Barsoum, M. W. (2000). The M_{n+1}AX_n phases: a new class of solids: thermodynamically stable nanolaminates. *Progress in Solid State Chemistry*, 28(1–4), 201–281. [https://doi.org/10.1016/S0079-6786\(00\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6786(00)00006-6)
12. Bibi, S., Shah, S. S. A., Nazir, M. A., Helal, M. H., El-Bahy, S. M., El-Bahy, Z. M., Ullah, S., Wattou, M. A., & Rehman, A. (2024). MOF/MXene composites: synthesis, application and future perspectives. *Advanced Sustainable Systems*, 8(8), 2400011. <https://doi.org/10.1002/adsu.202400011>
13. Borah, A. J., Natu, V., Biswas, A., & Srivastava, A. (2025). A review on recent progress in synthesis, properties, and applications of MXenes. *Oxford Open Materials Science*, 5(1), itae017. <https://doi.org/10.1093/oxfmat/itae017>
14. Buhari, S., Ahuja, M., Babu, B., & Chalana, A. (2025). Advances in MXenes: synthesis and electrochemical applications. *Advanced Sustainable Systems*, 9(9), e00419. <https://doi.org/10.1002/adsu.202500419>
15. Chhowalla, M., Shin, H. S., Eda, G., Li, L.-J., Loh, K. P., & Zhang, H. (2013). The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets. *Nature Chemistry*, 5(4), 263–275. <https://doi.org/10.1038/nchem.1589>
16. Conway, B. E. (2013). *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*. Springer Science & Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-3058-6>
17. Dahlqvist, M., Barsoum, M. W., & Rosen, J. (2024). MAX phases – Past, present, and future. *Materials Today*, 72, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2023.11.010>
18. Deng, R., Zhang, H., Zhang, Y., Chen, Z., Sui, Y., Ge, X., Liang, Y., Hu, S., Yu, G., & Jiang, D. (2017). Graphene/Mo₂C heterostructure directly grown by chemical vapor deposition. *Chinese Physics B*, 26(6), 067901. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/26/6/067901>
19. Dhas, A. K., Pansare, D. N., & Katariya, A. P. (2026). A review on MXene–polymer composites for water treatment to remove emerging contaminants. In *Advances in Treatment Methods Towards Emerging Contaminants* (pp. 311–318). <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-34270-7.00003-1>
20. Ding, H., Li, Y., Li, M., Chen, K., Liang, K., Chen, G., Lu, J., Palisaitis, J., Persson, P. O. Å., Eklund, P., Hultman, L., Du, S., Chai, Z., Gogotsi, Y., & Huang, Q. (2023). Chemical scissor-mediated structural editing of layered transition metal carbides. *Science*, 379(6637), 1130–1135. <https://doi.org/10.1126/science.add5901>
21. Ding, L., Wei, Y., Wang, Y., Chen, H., Caro, J., & Wang, H. (2017). A two-dimensional lamellar membrane: MXene nanosheet stacks. *Angewandte Chemie International Edition*, 56(7), 1825–1829. <https://doi.org/10.1002/anie.201609306>

22. Ding, M., Zhou, H., Ge, M., Jiang, Z., Xu, H., Jia, X., Gao, E., Mallya, D., & Gao, L. (2025). MXene-based catalysts for water purification in the persulfate-based Fenton-like system. *Journal of Water Process Engineering*, 77, 108291. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108291>
23. Elsa, G., Hanan, A., Walvekar, R., Numan, A., & Khalid, M. (2025). Zirconium-based MXenes: Synthesis, properties, applications, and prospects. *Coordination Chemistry Reviews*, 526, 216355. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216355>
24. Er, D., Shenoy, V. B., & Barsoum, M. W. (2023). MXenes: from discovery to applications of two-dimensional metal carbides and nitrides (Y. Gogotsi & B. Anasori, Eds.). New York: Jenny Stanford Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781003306511>
25. Etzkorn, J., Ade, M., & Hillebrecht, H. (2007). Ta₃AlC₂ and Ta₄AlC₃ - Single-crystal investigations of two new ternary carbides of tantalum synthesized by the molten metal technique. *Inorganic Chemistry*, 46(4), 1410–1418. <https://doi.org/10.1021/ic062231y>
26. Fang, L., Lin, L., Wu, Z., Xu, T., Wang, X., Chang, L., & Nie, P. (2023). High-performance layered CaV₄O₉-MXene composite cathodes for aqueous zinc ion batteries. *Nanomaterials*, 13(9), 1536. <https://doi.org/10.3390/nano13091536>
27. Feng, A., Yu, Y., Jiang, F., Wang, Y., Mi, L., Yu, Y., & Song, L. (2017). Fabrication and thermal stability of NH₄HF₂-etched Ti₃C₂ MXene. *Ceramics International*, 43(8), 6322–6328. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.02.039>
28. Feng, A., Yu, Y., Mi, L., Yu, Y., & Song, L. (2019). Comparative study on electrosorptive behavior of NH₄HF₂-etched Ti₃C₂ and HF-etched Ti₃C₂ for capacitive deionization. *Ionics*, 25(2), 727–735. <https://doi.org/10.1007/s11581-018-2787-9>
29. Geng, D., Zhao, X., Li, L., Song, P., Tian, B., Liu, W., Chen, J., Shi, D., Lin, M., Zhou, W., & Loh, K. P. (2016). Controlled growth of ultrathin Mo₂C superconducting crystals on liquid Cu surface. *2D Materials*, 4(1), 011012. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/aa51b7>
30. Gogotsi, Y., & Anasori, B. (2019). The rise of MXenes. *ACS Nano*, 13, 8491–8494. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b06394>
31. Halim, J., Lukatskaya, M. R., Cook, K. M., Lu, J., Smith, C. R., Näslund, L.-Å., May, S. J., Hultman, L., Gogotsi, Y., Eklund, P., & Barsoum, M. W. (2014). Transparent conductive two-dimensional titanium carbide epitaxial thin films. *Chemistry of Materials*, 26(7), 2374–2381. <https://doi.org/10.1021/cm500641a>
32. Heidarpour, A., Faraji, M., & Haghighi, A. (2022). Production and characterization of carbide-derived-nanocarbon structures obtained by HF electrochemical etching of Ti₃AlC₂. *Ceramics International*, 48(8), 11466–11474. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.003>
33. Högberg, H., Eklund, P., Emmerlich, J., Birch, J., & Hultman, L. (2005). Epitaxial Ti₂GeC, Ti₃GeC₂, and Ti₄GeC₃ MAX-phase thin films grown by magnetron sputtering. *Journal of Materials Research*, 20(4), 779–782. <https://doi.org/10.1557/JMR.2005.0105>
34. Hu, C., Lai, C.-C., Tao, Q., Lu, J., Halim, J., Sun, L., Zhang, J., Yang, J., Anasori, B., Wang, J., Sakka, Y., Hultman, L., Eklund, P., Rosen, J., & Barsoum, M. W. (2015). Mo₂Ga₂C: a new ternary nanolaminated carbide. *Chemical Communications*, 51(30), 6560–6563. <https://doi.org/10.1039/C5CC00980D>
35. Hu, W., Yang, M., Fan, T., Li, Z., Wang, Y., Li, H., Zhu, G., Li, J., Jin, H., & Yu, L. (2023). A simple, efficient, fluorine-free synthesis method of MXene/Ti₃C₂T_x anode through molten salt etching for sodium-ion batteries. *Battery Energy*, 2(5), 20230021. <https://doi.org/10.1002/bte2.20230021>
36. Hugosson, H. W., Eriksson, O., Nordström, L., Jansson, U., Fast, L., Delin, A., Wills, J. M., & Johansson, B. (1999). Theory of phase stabilities and bonding mechanisms in stoichiometric and substoichiometric molybdenum carbide. *Journal of Applied Physics*, 86(7), 3758–3767. <https://doi.org/10.1063/1.371284>

37. Jawaid, A., Hassan, A., Neher, G., Nepal, D., Pachter, R., Kennedy, W. J., Ramakrishnan, S., & Vaia, R. A. (2021). Halogen etch of Ti_3AlC_2 MAX phase for MXene fabrication. *ACS Nano*, 15(2), 2771–2777. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c08630>
38. Jeitschko, W., Nowotny, H. T., & Benesovsky, F. (1964). Carbides of formula T_2MC . *Journal of the Less Common Metals*, 7(2), 133–138. [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(64\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0022-5088(64)90015-2)
39. Jussambayev, M., Shakenov, K., Sultakhan, S., Zhantikeev, U., Askaruly, K., Toshtay, K., & Azat, S. (2025). MXenes for sustainable energy: a comprehensive review on conservation and storage applications. *Carbon Trends*, 100471. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100471>
40. Kalsoom, U., Khan, S., Kashif, M., Yaseen, H. S., Hussain, S. A., Azizi, S., & Maaza, M. (2025). MXene-based hybrid composites for lithium-ion batteries: Advances in synthesis strategies and electrochemical performance. *Ionics*, 31(10), 10053–10073. <https://doi.org/10.1007/s11581-025-06628-z>
41. Kang, K. M., Kim, D. W., Ren, C. E., Cho, K. M., Kim, S. J., Choi, J. H., Nam, Y. T., Gogotsi, Y., & Jung, H. T. (2017). Selective molecular separation on $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -graphene oxide membranes during pressure-driven filtration: comparison with graphene oxide and MXenes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(51), 44687–44694. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.101029>
42. Karlsson, L. H., Birch, J., Halim, J., Barsoum, M. W., & Persson, P. O. Å. (2015). Atomically resolved structural and chemical investigation of single MXene sheets. *Nano Letters*, 15(8), 4955–4960. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b00737>
43. Lai, C. C., Meshkian, R., Dahlqvist, M., Lu, J., Näslund, L.-Å., Rivin, O., Caspi, E. N., Ozeri, O., Hultman, L., Eklund, P., Barsoum, M. W., & Rosén, J. (2015). Structural and chemical determination of the new nanolaminated carbide $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$ from first principles and materials analysis. *Acta Materialia*, 99, 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.07.063>
44. Lane, N. J., Jović, V., Jaćimović, J., Barsoum, M. W., & Finkel, P. (2012). Structure of a new bulk $\text{Ti}_5\text{Al}_2\text{C}_3$ MAX phase produced by the topotactic transformation of Ti_2AlC . *Journal of the European Ceramic Society*, 32(12), 3485–3491. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.03.035>
45. Li, A., Zhu, Q., Mi, Y., Ur Rehman, H., Shoaib, M., Cao, X., & Wang, N. (2025). Triboelectric nanogenerator drives electrochemical water splitting for hydrogen production: fundamentals, progress, and challenges. *Small*, 21(1), 2407043. <https://doi.org/10.1002/sml.202407043>
46. Li, M., Li, X., Qin, G., Chen, C., Zeng, Y., Huang, X., & Chen, J. (2021). Halogenated Ti_3C_2 MXenes with electrochemically active terminals for high-performance zinc ion batteries. *ACS Nano*, 15(1), 1077–1085. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c07972>
47. Li, M., & Song, S. (2025). Synergistic experimental and computational strategies for MXene-based zinc-ion batteries. *Batteries*, 12(1), 8. <https://doi.org/10.3390/batteries12010008>
48. Li, T., Yao, L., Liu, Q., Gu, J., Chen, B., Zhang, W., & Luo, R. (2018). Fluorine-free synthesis of high-purity $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ($\text{T} = \text{OH}, \text{O}$) via alkali treatment. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(21), 6115–6119. <https://doi.org/10.1002/anie.201800887>
49. Li, Y., Zhang, H., Huang, Y., Li, J., Liu, Y., & Wang, X. (2017). Facile preparation of in situ coated $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ composites and their electromagnetic performance. *RSC Advances*, 7(40), 24698–24708. <https://doi.org/10.1039/C7RA03402D>
50. Li, Y., Huo, J., Ma, X., Miao, Y., Zhang, X., & Liu, J. (2020). A general Lewis acidic etching route for preparing MXenes with enhanced electrochemical performance in non-aqueous electrolyte. *Nature Materials*, 19(8), 894–899. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0657-0>
51. Lim, K. R. G., Shekhirev, M., Wyatt, B. C., Anasori, B., Gogotsi, Y., & Mikhael, B. (2022). Fundamentals of MXene synthesis. *Nature Synthesis*, 1(8), 601–614. <https://doi.org/10.1038/s44160-022-00104-6>
52. Lin, Z. J., Li, M. S., Wang, J. Y., & Zhou, Y. C. (2006). Structural characterization of a new layered-ternary Ta_4AlC_3 ceramic. *Journal of Materials Research*, 21(10), 2587–2592. <https://doi.org/10.1557/jmr.2006.0310>

53. Liu, J., Chen, S., Shang, W., & Zhang, J. (2025). From surface chemistry to ion dynamics: mechanistic roles of MXenes in aqueous zinc-ion batteries. *EES Batteries*, 1(5), 1047–1067. <https://doi.org/10.1039/D5EB00114E>
54. Liu, L., Orbay, M., Luo, S., Duluard, S., Shao, H., Harmel, J., Rozier, P., Taberna, P.-L., & Simon, P. (2021). Exfoliation and delamination of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene prepared via molten salt etching route. *ACS Nano*, 16(1), 111–118. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c08498>
55. Lukatskaya, M. R., Mashtalir, O., Ren, C. E., Dall'Agnese, Y., Rozier, P., Taberna, P.-L., Naguib, M., Simon, P., Barsoum, M. W., & Gogotsi, Y. (2013). Cation intercalation and high volumetric capacitance of two-dimensional titanium carbide. *Science*, 341(6153), 1502–1505. <https://doi.org/10.1126/science.1241488>
56. Luo, R., Li, R., Jiang, C., Qi, R., Liu, M., Luo, C., Lin, H., Huang, R., & Peng, H. (2021). Facile synthesis of cobalt modified 2D titanium carbide with enhanced hydrogen evolution performance in alkaline media. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(64), 32536–32545. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.110>
57. Luo, Y., Jia, S., Yi, Y., Liu, X., Zhang, G., Yang, H., Li, W., Wang, J., & Li, X. (2024). Nitrogen-doped Ti_3C_2 MXene films with low-F terminal groups achieving an ultrahigh volumetric capacitance. *Journal of Alloys and Compounds*, 977, 173355. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173355>
58. Madni, A., Rana, U., Rafiq, A., Hayat, H., Iqbal, M. Z., Khan, W. S., & Bajwa, S. Z. (2025). MXene-based electrochemical sensors for cancer biomarker detection: current trends, challenges, and future directions. *Microchimica Acta*, 192(12), 804. <https://doi.org/10.1007/s00604-025-07638-4>
59. Magnuson, M., & Mattesini, M. (2017). Chemical bonding and electronic structure in MAX phases as viewed by X-ray spectroscopy and density functional theory. *Thin Solid Films*, 621, 108–130. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.11.005>
60. Mashtalir, O., Lukatskaya, M. R., Zhao, M. Q., Naguib, M., Gogotsi, Y., & Barsoum, M. W. (2023). Amine-assisted delamination of Nb_2C MXene for Li-ion energy storage devices. In *MXenes* (pp. 401–414). Jenny Stanford Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781003306511>
61. Mehrpooya, M., Eivari, M. E., Ganjali, M. R., & Lee, M. H. (2026). The progress of MXene hydrogels fabrication for supercapacitor applications. *Journal of Power Sources*, 661, 238653. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238653>
62. Mendhe, A. C., Rengasamy, M., Pradeep, H., Bhoyar, T., Chandirasekar, K., Kore, A., & Lee, H. (2026). Recent advances and insights into carbon-based materials synergistically enhancing MXene for supercapacitor, battery, solar cell, and electrocatalytic applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 550, 217400. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.217400>
63. Miller, J. R., & Simon, P. (2008). Electrochemical capacitors for energy management. *Science*, 321(5889), 651–652. <https://doi.org/10.1126/science.1158736>
64. Murali, G., Modigunta, J. K. R., Park, Y. H., Lee, J.-H., Rawal, J., Lee, S.-Y., In, I., & Park, S.-J. (2022). A review on MXene synthesis, stability, and photocatalytic applications. *ACS Nano*, 16(9), 13370–13429. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c04750>
65. Mussa, N. S., Askaruly, K., Bexetova, K., Azat, S., & Toshtay, K. (2025). Recent advancements in MXene-based catalysts: synthesis, characterization, and applications in sustainable energy production. *Carbon Trends*, 100551. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100551>
66. Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., Lu, J., Niu, J., Heon, M., & Barsoum, M. W. (2011). Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 . *Advanced Materials*, 23(37), 4248–4253. <https://doi.org/10.1002/adma.201102306>
67. Naguib, M., Halim, J., Lu, J., Cook, K. M., Hultman, L., Gogotsi, Y., & Barsoum, M. W. (2013). New two-dimensional niobium and vanadium carbides as promising materials for Li-ion batteries. *Journal of the American Chemical Society*, 135(43), 15966–15969. <https://doi.org/10.1021/ja405735d>

68. Natu, V., Pai, R., Sokol, M., Carey, M., Kalra, V., & Barsoum, M. W. (2020). 2D $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tz}$ MXene synthesized by water-free etching of Ti_3AlC_2 in polar organic solvents. *Chem*, 6(3), 616–630. <https://doi.org/10.1149/MA2020-022261mtgabs>
69. Ng, S. F., Foo, J. J., & Ong, W. J. (2022). Solar-powered chemistry: Engineering low-dimensional carbon nitride-based nanostructures for selective CO_2 conversion to C1–C2 products. *InfoMat*, 4(1), e12279. <https://doi.org/10.1002/inf2.12279>
70. Goossens, N., Tunca, B., Lapauw, T., Lambrinou, K., & Vleugels, J. (2021). MAX phases: structure, processing and properties. In *Encyclopedia of Materials: technical Ceramics and Glasses* (pp. 182–199). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818542-1.00015-1>
71. Nouseen, S., & Pumera, M. (2025). Electrochemical etching of MXenes: mechanism, challenges and future outlooks. *Journal of Materials Chemistry A*, 13(40), 34055–34084. <https://doi.org/10.1039/D5TA04176G>
72. Ostermann, M., Piljević, M., Akbari, E., Patil, P., Zahorodna, V., Baginskiy, I., Gogotsi, O., Gachot, C., & Ripoll, M. R. (2025). Pulsed electrochemical exfoliation for an HF-free sustainable MXene synthesis. *Small*, 21, 2500807. <https://doi.org/10.1002/sml.202500807>
73. Otgonbayar, Z., & Oh, W. C. (2023). MXene-based nanocomposite for the photocatalytic CO_2 reduction: comprehensive review. *Molecular Catalysis*, 541, 113085. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2023.113085>
74. Palmquist, J. P., Li, S., Persson, P. O. Å., Emmerlich, J., Wilhelmsson, O., Högborg, H., Katsnelson, M. I., Johansson, B., Ahuja, R., Eriksson, O., Hultman, L., & Jansson, U. (2004). $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$ phases in the Ti–Si–C system studied by thin-film synthesis and ab initio calculations. *Physical Review B*, 70(16), 165401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.165401>
75. Pan, Y. (2024). W_2AlC : a new layered MAX phase to adjust the balance between strength and ductility. *Materials Today Chemistry*, 35, 101915. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.101915>
76. Pandey, S., Ghimire, M., Kim, T., Jung, M. Y., Asaithambi, S., Dong, W. J., Son, J. W., Yun, Y. J., & Jun, Y. (2025). Synthesis of porous MXene for efficient bifunctional electrocatalysis in overall water splitting: hydrogen and oxygen evolution reactions. *FlatChem*, 50, 100837. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2025.100837>
77. Pandit, M. A., Yuan, J., Nazir, R., Dong, Y., & Li, Q. (2025). A brief review on the progress of MXene-based catalysts for electro- and photochemical water splitting for hydrogen generation. *Chemical Communications*, 61(13), 2602–2626. <https://doi.org/10.1039/D4CC05868B>
78. Pang, S. Y., Io, W. F., Wong, L. W., Lao, X., Bai, Q., Chan, K. L., Zhao, J., & Hao, J. (2025). Fluoride-free molten salt hydrate-assisted synthesis of MXene in air down to 150 °C. *Advanced Functional Materials*, 35, 2504864. <https://doi.org/10.1002/adfm.202504864>
79. Papadopolou, K. A., Chronos, A., Parfitt, D., & Christopoulos, S. R. G. (2020). A perspective on MXenes: their synthesis, properties, and recent applications. *Journal of Applied Physics*, 128(17), 170902. <https://doi.org/10.1063/5.0021485>
80. Pietzka, M. A., & Schuster, J. C. (1994). Summary of constitutional data on the aluminum–carbon–titanium system. *Journal of Phase Equilibria*, 15(4), 392–400. <https://doi.org/10.1007/BF02647559>
81. Pu, S., Wang, Z., Xie, Y., Zhang, H., Zhang, J., Wang, Y., & Liu, Y. (2023). Origin and regulation of self-discharge in MXene supercapacitors. *Advanced Functional Materials*, 33(8), 2208715. <https://doi.org/10.1002/adfm.202208715>
82. Pugazhendhi, A., Kamarudin, S. K., & Brindhadevi, K. (2026). MXenes as catalyst for sustainable hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116376. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116376>
83. Qi, W., Shapter, J. G., Wu, Q., Yin, T., Gao, G., & Cui, D. (2017). Nanostructured anode materials for lithium-ion batteries: principle, recent progress and future perspectives. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(37), 19521–19540. <https://doi.org/10.1039/C7TA05283A>

84. Raj, K., Jhala, R., Sujai, S., Pattanayak, B., Singh, J., Kumar, P., Kaladhar, M., Singh, R., Bisht, Y., & Gautam, A. (2025). A comprehensive review on the MXene-based catalysts for hydrogen generation via water splitting processes. *Journal of Molecular Structure*, 1324, 143534. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.143534>
85. Rana, A. S., Raza, N., Anwar, M. J., & Nazar, M. F. (2025). Advancing MXenes through green chemistry for sustainable future. *Materials Research Bulletin*, 113720. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2025.113720>
86. Rao, T., Wang, X., Chen, Z., Liu, Y., & Zhang, J. (2021). Nanostructured metal nitrides for photocatalysts. *Journal of Materials Chemistry C*, 9(16), 5323–5342. <https://doi.org/10.1039/D0TC05609J>
87. Rouhi, S., Bay, M., Aydin, O., Yildiz, M., & Alkan, M. (2025). Large-area growth of Mo₂ C thin films and MXene structures via the PVD–CVD hybrid technique. *New Journal of Chemistry*, 49, 10194–10204. <https://doi.org/10.1039/D4NJ05530F>
88. Sahith, V. N., Kumar, A., Sruthi, V. S., Krithiga, T., Sundararaman, S., & Hosseini-Bandegharai, A. (2025). MXenes-based sorbents: pioneering nanomaterials and its mechanism for advanced dye remediation in aqueous environments. *Next Materials*, 9, 101029. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.101029>
89. Salim, O., Mahmoud, K. A., Pant, K. K., & Joshi, R. K. (2019). Introduction to MXenes: synthesis and characteristics. *Materials Today Chemistry*, 14, 100191. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2019.08.010>
90. Shao, B., Liu, Z., Zeng, G., Wang, H., Liang, Q., He, Q., Cheng, M., Zhou, C., Jiang, L., & Song, B. (2020). Two-dimensional transition metal carbide and nitride (MXene) derived quantum dots (QDs): synthesis, properties, applications and prospects. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(16), 7508–7535. <https://doi.org/10.1039/D0TA01552K>
91. Siddique, S., Waheed, A., Iftikhar, M., Mehran, M. T., Zarif, M. Z., Arafat, H. A., Hussain, S., & Shahzad, F. (2023). Fluorine-free MXenes via molten salt Lewis acidic etching: applications, challenges, and future outlook. *Progress in Materials Science*, 139, 101183. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101183>
92. Sidorowicz, A., Wicht, T., Stöger-Pollach, M., Licheri, R., Cao, G., Concas, A., & Rupprechter G. (2025). Influence of MXene and TiO₂ on the performance of microalgae-derived Ru-based catalysts for CO₂ hydrogenation to methane. *ACS Catalysis*, 15(17), 15261–15278. <https://doi.org/10.1021/acscatal.5c04285>
93. Sun, Z., Yuan, M., Lin, L., Yang, H., Nan, C., Li, H., Sun, G., & Yang, X. (2019). Selective lithiation–expansion–microexplosion synthesis of two-dimensional fluoride-free MXene. *ACS Materials Letters*, 1(6), 628–632. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.9b00390>
94. Tang, H., Hu, Q., Zheng, M., Chi, Y., Qin, X., Pang, H., & Xu, Q. (2018). MXene–2D layered electrode materials for energy storage. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(2), 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.03.00395>
95. Tran, P. K. L., Nguyen, T. H., Tran, D. T., Pham, T. T., Nguyen, T. T. N., Le, T. H., Nguyen, H. T. (2025). Tunable charge Pt sites-dominated alloy confined by MXene-derived oxycarbide enables ultra-stable ampere-level hydrogen production. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 363, 124801. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.124801>
96. Urbankowski, P., Anasori, B., Makaryan, T., Er, D., Kota, S., Walsh, P. L., & Gogotsi, Y. (2016). Synthesis of two-dimensional titanium nitride Ti₄N₃ (MXene). *Nanoscale*, 8(22), 11385–11391. <https://doi.org/10.1039/C6NR02253G>
97. Wang, C., Sun, Z., Zheng, Y., & Hu, Y. H. (2019). Recent progress in visible light photocatalytic conversion of carbon dioxide. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(3), 865–887. <https://doi.org/10.1039/C8TA09865D>
98. Wang, Y., Yang, G., Chao, M., Zhao, J., Wang, W.-T., Yan, J., Wang, Q., & Yang, R. (2025). Molten salts etching-driven in situ construction of MOF-derived Co/Co–N–C/MXene toward

- oxygen reduction catalysis. *Energy & Fuels*, 39(17), 8283–8290. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c00357>
99. Wang, Z., Kochat, V., Pandey, P., Kashyap, S., Chattopadhyay, S., Samanta, A., Sarkar, S., Manimunda, P., Zhang, X., Asif, S., Singh, A. K., Chattopadhyay, K., Tiwary, C. S., & Ajayan, P. M. (2017). Metal immiscibility route to synthesis of ultrathin carbides, borides, and nitrides. *Advanced Materials*, 29(29), 1700364. <https://doi.org/10.1002/adma.201700364>
100. Wei, Y., Zhang, P., Soomro, R. A., Zhu, Q., & Xu, B. (2021). Advances in the synthesis of 2D MXenes. *Advanced Materials*, 33(39), 2103148. <https://doi.org/10.1002/adma.202103148>
101. Xiao, X., Urbankowski, P., Hantanasirisakul, K., Yang, Y., Sasaki, S., Yang, L., Chen, C., Wang, H., Miao, L., Tolbert, S. H., Billinge, S. J. L., Abruña, H. D., May, S. J., & Gogotsi, Y. (2019). Scalable synthesis of ultrathin Mn_3N_2 exhibiting room-temperature antiferromagnetism. *Advanced Functional Materials*, 29(17), 1809001. <https://doi.org/10.1002/adfm.201809001>
102. Xu, C., Wang, L., Liu, Z., Chen, L., Guo, J., Kang, N., Ma, X.-L., Cheng, H.-M., & Ren, W. (2015). Large-area high-quality 2D ultrathin Mo_2C superconducting crystals. *Nature Materials*, 14(11), 1135–1141. <https://doi.org/10.1038/nmat4374>
103. Xu, Y., Gao, D., Li, Y., Fang, Y., Huang, Y., Tang, C., & Guo, Z. (2025). Understanding the CO_2 activation and hydrogenation mechanism on MXene under electrochemical conditions. *ChemPhysChem*, 26(16), e202500101. <https://doi.org/10.1002/cphc.202500101>
104. Yaseen, M., Khattak, M. A. K., Humayun, M., Usman, M., Shah, S. S., Bibi, S., Hasnain, B. S. U., Ahmad, S. M., Khan, A., Shah, N., Tahir, A. A., & Ullah, H. (2021). A review of supercapacitors: materials design, modification, and applications. *Energies*, 14(22), 7779. <https://doi.org/10.3390/en14227779>
105. Younis, A., Idrisov, E., Thaker, S., Hamed, F., Sadki, E. H., Iqbal, M. Z., Mahmood, T., Shabbir, B., & Bao, Q. (2025). Advances in MXene-based electronics via surface and structural redesigning and beyond. *Advanced Electronic Materials*, 11(14), e00321. <https://doi.org/10.1002/aelm.202500321>
106. Zeng, W., Ye, X., Dong, Y., Zhang, Y., Sun, C., Zhang, T., Guan, X., & Guo, L. (2024). MXene for photocatalysis and photothermal conversion: synthesis, physicochemical properties, and applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 508, 215753. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215753>
107. Zhang, C., McKeown, J. T., & Pomerantseva, E. (2019). MXenes for energy storage. *Journal of Physics: Energy*, 7(15), 7626–7654. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/ab9b1d>
108. Zhang, T., Pan, L., Tang, H., Du, F., Guo, Y., Qiu, T., & Yang, J. (2017). Synthesis of two-dimensional $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene using $\text{HCl}+\text{LiF}$ etchant: enhanced exfoliation and delamination. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 818–826. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.127>
109. Zhang, T., Shevchuk, K., Wang, R. J., Kim, H., Hourani, J., & Gogotsi, Y. (2024). Delamination of chlorine-terminated MXene produced using molten salt etching. *Chemistry of Materials*, 36(4), 1998–2006. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c02872>
110. Zhang, Y., Feng, Z., Wang, X., Hu, H., & Wu, M. (2023). MXene/carbon composites for electrochemical energy storage and conversion. *Materials Today Sustainability*, 22, 100350. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100350>
111. Zhang, Z., Zhang, F., Wang, H., Chan, C. H., Lu, W., & Dai, J.-Y. (2017). Substrate orientation-induced epitaxial growth of face-centered cubic Mo_2C superconductive thin film. *Journal of Materials Chemistry C*, 5(41), 10822–10827. <https://doi.org/10.1039/C7TC03652C>
112. Zhao, J., Wen, J., Bai, L., Xiao, J., Zheng, R., Shan, X., Li, L., Gao, H., & Zhang, X. (2019). One-step synthesis of few-layer niobium carbide MXene as a promising anode material for high-rate lithium-ion batteries. *Dalton Transactions*, 48(38), 14433–14439. <https://doi.org/10.1039/C9DT03260F>

113. Zhao, Y., Que, M., Chen, J., & Yang, C. (2020). MXenes as co-catalysts for the solar-driven photocatalytic reduction of CO₂. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(46), 16258–16281. <https://doi.org/10.1039/D0TC02979C>
114. Zhou, A. (2012). Methods of MAX-phase synthesis and densification–II. In *Advances in Science and Technology of M_{n+1}AX_n Phases* (pp. 21–46). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096012.21>
115. Zhou, H., Chen, Z., Kountoupi, E., Zhu, C., Liu, Y., Liu, Y., Hu, J., Zhao, Y., & Chen, J. (2021). Two-dimensional molybdenum carbide 2D-Mo₂C as a superior catalyst for CO₂ hydrogenation. *Nature Communications*, 12(1), 5510. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25784-0>

Recent progress in MXene synthesis: applications in catalysis and sustainable energy storage

Seitkhan Azat, Zhadyra Assengali, Inabat Sapargali, Kainaubek Toshtay

Abstract. Two-dimensional (2D) MXene materials, composed of transition metal carbides, nitrides, and carbonitrides, represent a rapidly emerging class of functional materials. Derived from MAX phases through selective chemical etching, MXenes exhibit a unique combination of properties, including high electrical conductivity, tunable surface chemistry, hydrophilicity, and layered architecture. These characteristics make MXenes particularly attractive for applications requiring efficient energy transport and surface interactions, surpassing conventional 2D materials such as graphene and transition metals. This review addresses recent advances in MXene synthesis, with emphasis not only on traditional approaches but particularly on fluoride-free and low-fluoride routes, including electrochemical and molten salt processing techniques. The influence of these methods on surface functional groups, structural stability, and material properties is systematically analyzed. Additionally, delamination, heteroatom doping, and hybridization strategies are discussed as key routes to enhance the functional performance of MXenes. The expanding applications of MXenes in catalysis, energy storage, and conversion are examined in terms of structure–property–performance relationships. In energy storage devices, MXene materials deliver high capacity, long cycle stability, and rapid ion transport in lithium-ion and zinc-ion batteries, as well as supercapacitors. MXenes and their hybrid derivatives also show great promise as efficient, stable, and versatile materials for photocatalysis, electrocatalysis, and CO₂ hydrogenation systems. This review establishes a unified scientific framework for the rational design of MXenes and paves the way for future research aimed at developing sustainable and application-oriented MXene-based technologies.

Keywords: MAX phase; MXene; synthesis methods; catalysis; energy storage.

Современные достижения в синтезе MXene: применение в катализе и устойчивом хранении энергии

Сейтхан Азат, Жадыра Асенгали, Инабат Сапаргали, Кайнаубек Тоштай

Аннотация. Двумерные (2D) материалы MXene – это класс функциональных материалов, состоящий из карбидов, нитридов и карбонитридов переходных металлов, который в последние годы активно развивается. MXene, получаемые селективным химическим удалением из фаз MAX, характеризуются уникальным сочетанием свойств, включая высокую электропроводность, настраиваемую поверхность, гидрофильность и слоистую архитектуру. Эти особенности делают MXene особенно привлекательными для приложений, требующих

передачи энергии и поверхностного взаимодействия, по сравнению с традиционными 2D материалами, такими как графен и переходные металлы. В данной обзорной статье рассматриваются последние достижения в синтезе MXene и уделяется внимание как традиционным методам, так и маршрутам с низким или отсутствующим содержанием фтора, включая электрохимические методы и синтез с использованием расплавленных солей. Систематически анализируется влияние этих подходов на природу терминальных функциональных групп, структурную стабильность и свойства материалов. Кроме того, обсуждаются стратегии деламации, легирования гетероатомами и гибридизации как основным путем повышения функциональной эффективности MXene. Расширяющиеся области применения MXene в катализе, хранении и преобразовании энергии рассматриваются с точки зрения связи структура–свойства–эффективность. В устройствах хранения энергии материалы MXene обеспечивают высокую емкость, долговечность циклов и быструю ионную проводимость в литий-ионных и цинк-ионных батареях, а также в суперконденсаторах. MXene и их гибридные производные представляют собой перспективные материалы для фотокатализа, электрокатализа и процессов гидрирования углекислого газа (CO_2), обеспечивая высокую эффективность, стабильность и гибкость. Данный обзор формирует целостную научную основу для рационального проектирования MXene и открывает перспективы будущих исследований, направленных на развитие устойчивых и прикладных технологий на основе MXene.

Ключевые слова: MAX-фаза; Mxene; методы синтеза; катализ; хранение энергии.