

Zhursinay Saduakhaskyzy Serikbayeva* – master student of «Technology of inorganic and petrochemical productions» department; M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: Zhursinay.Serikbaeva@mail.ru.

Yevgeny Gennadievich Kulikov – master, Engineer of Regional testing laboratory for engineering «Construction and biochemical materials», M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: keg.1988@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2144-5065>.

Raissa Ruvkatovna Yakubova – Candidate of technical science, Associate Professor of «Technology of inorganic and petrochemical productions» department; M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: yarr-57@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1813-1933>.

Bagdagul Saduekhasovna Serikbaeva – PhD Doctor, instructor of «Technology of inorganic and petrochemical productions» department, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent; e-mail: sbagdash@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4408-7967>.

Поступила в редакцию 08.01.2025

Поступила после доработки 04.04.2025

Принята к публикации 07.04.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2\(18\)-60](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-60)

МРНТИ: 35.15.19



М. Әліпұлы^{1*}, Н.Н. Нұрғалиев², Қ. Асқарұлы¹, Mohammad Khalid³, С. Азат¹

¹Satbayev Univeristy,

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

²Шәкәрім университет,

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

³Университет Глазго,

G12 8QQ, Великобритания, Глазго, пр. Университет

*e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com

МАТЕРИАЛЫ МХЕНЕ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА, ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ПОКРЫТИЙ И КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация: Статья представляет обзор современных методов синтеза МХене – двумерных материалов, включающих карбиды, нитриды и карбонитриды переходных металлов, с акцентом на экологически безопасные подходы и их перспективы в качестве покрытий и композитов. Рассматриваются традиционные методы травления с использованием фторидов, таких как плавиковая кислота, и их недостатки, включая экологические риски. В противовес им описаны «зеленые» технологии, такие как электрохимическое травление и методы с расплавленными солями, которые минимизируют воздействие на окружающую среду и повышают масштабируемость производства. Особое внимание уделено уникальным свойствам МХене: высокой электропроводности, механической гибкости и гидрофильности, что делает их востребованными в энергетике, электронике и экологии. В статье подчеркивается их потенциал в антикоррозионных, антибактериальных покрытиях, защите от электромагнитных помех и сенсорных системах. Также обсуждаются возможности применения МХене в Казахстане, включая использование местного сырья для производства суперконденсаторов, биомедицинских материалов и катализаторов для аэрокосмической отрасли. Экономическая эффективность локального синтеза подчеркивает перспективы для развития высокотехнологичных отраслей. Работа направлена на освещение текущих достижений и вдохновение на дальнейшие исследования в области устойчивого материаловедения, демонстрируя, как МХене могут способствовать инновациям, сочетая функциональность с экологической ответственностью.

Ключевые слова: МХене, покрытия, композиты, антикоррозионные свойства, антибактериальные свойства

Введение

Материалы на основе карбидов, нитридов и карбонитридов переходных металлов, известные как МХenes, представляют собой активно развивающееся направление в области двумерных материалов [1]. Они вызвали большой интерес у научного сообщества за счёт своей оригинальной структуры и выдающихся физико-химических характеристик [2]. Как правило, МХenes получают методом селективного травления карбидов алюминия

переходных металлов, в результате чего формируются материалы с высокой электрической проводимостью, механической гибкостью и гидрофильностью. Эти характеристики делают их особенно перспективными для широкого спектра применений – от систем накопления энергии до технологий экологической ремедиации [3, 4]. Универсальность MXenes дополнительно усиливается их способностью образовывать композиты с полимерами и другими материалами, что расширяет их функциональные возможности, такие как защитные покрытия и разработки многофункциональных материалов [5, 6].

В последние годы наблюдается заметный сдвиг в сторону разработки экологически чистых методов синтеза MXenes, отказ от традиционных методов травления на основе фторидов в пользу более устойчивых альтернатив. Подходы, такие как анодное электрохимическое травление и методы с использованием расплавленных солей, позволяют получать высококачественные MXenes и минимизировать воздействие на окружающую среду [7-9]. Такие достижения соответствуют растущему акценту на более зеленые технологии в материаловедении, которые стремятся сбалансировать инновации с экологическими соображениями [8, 9]. Более того, устойчивые методы производства способствуют улучшению масштабируемости и экономической эффективности, что является ключевыми факторами для промышленных применений [9, 10].

По мере развития интереса к материалам MXene всестороннее понимание их синтеза, свойств и применений становится решающим [11]. Данная статья направлена на освещение современных методов синтеза MXenes, подчеркивание их экологически чистых парадигм и углубленное изучение их многообещающих перспектив для покрытий и композитных материалов. Применения могут использовать барьерные способности MXenes для защиты от коррозии и их значительные механические свойства для повышения производительности в различных условиях [3, 5, 6]. В конечном итоге, это исследование стремится не только обрисовать текущий ландшафт технологии MXene, но и вдохновить на будущие разработки в области устойчивого материаловедения и инновационных применений.

Методы синтеза MXene

Традиционное травление на основе высокочастотного излучения

Наиболее распространенный метод синтеза MXenes включает травление фаз MAX (сокращение от $M(n+1)AX(n)$, где M это переходный металл, A это элемент, такой как алюминий, и X – углерод и/или азот) [12] с использованием плавиковой кислоты (HF) или фторида на основе решения [13]. Этот традиционный метод преимущественно удаляет слой A (алюминий) из фазы MAX, в результате чего получается многослойная структура MXene [14]. Однако этот метод подвергся тщательному изучению из-за экологических проблем и рисков, связанных с обращением с HF [15]. Процесс травления и концентрация HF существенно влияют на свойства получаемых MXenes; например, увеличение концентрации HF приводит к образованию открытой, гармонической структуры, что приводит к увеличению расстояния между слоями, благоприятного для переноса ионов [16].

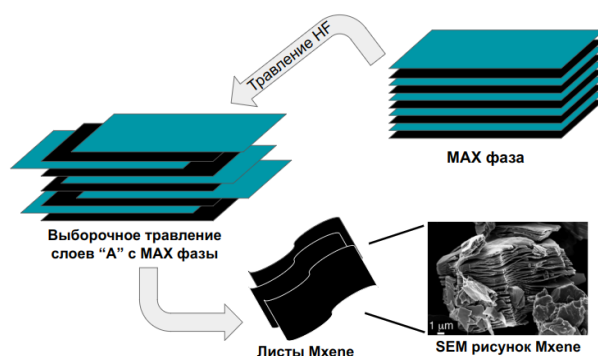


Рисунок 1 – Традиционный метод травления MAX фазы и получения листов Мхене.

Взято и изменено с [17]

Несмотря на успешную демонстрацию травления на основе высокочастотного излучения, остаются проблемы, особенно связанные с образованием нежелательных побочных продуктов, таких как фторид алюминия, которые могут еще больше усложнить процесс синтеза и снизить выход [18, 19]. Недавние исследования показали, что для обеспечения полного травления с высокой степенью очистки может потребоваться более 24

часов [20]. Электрохимические характеристики и стабильность MXenes, полученных с помощью высокочастотного травления, были улучшены за счет оптимизации таких параметров, как температура и время травления, которые помогают контролировать морфологию и размер чешуек [21, 22].

Альтернативные методы травления

В ответ на недостатки, связанные с высокочастотным травлением, были разработаны различные альтернативные методы травления [23]. К ним относятся кислотное травление по Льюису [23], травление расплавленной солью (рис. 2) [24] и электрохимические методы [25]. Например, было изучено использование хлорида цинка (ZnCl_2) и других кислот Льюиса, в которых происходит реакция замещения между катионами металлов и алюминием в фазе MAX [26]. Этот способ демонстрирует более широкую перспективу травления, позволяющую избежать использования токсичного фтора, хотя он по-прежнему требует тщательного учета воздействия на окружающую среду [23]. Вдобавок, травление расплавленной солью представляет собой альтернативу быстрому синтезу, значительно сокращая затраты времени по сравнению с традиционными методами, хотя достижение аналогичных результатов по-прежнему сопряжено с трудностями [20, 29].

Еще одной многообещающей альтернативой является электрохимическое травление [7]. Этот метод использует постоянный ток для достижения контролируемого отделения MXenes от их предшественников MAX и обеспечивает настраиваемое масштабируемое производство [27]. Кроме того, это открывает возможности для создания двумерных MXenes с улучшенными поверхностными свойствами [28]. В дополнение, в недавней работе, был представлен улучшенный метод электрохимического травления с использованием фтор-свободного бромидного электролита, который позволяет эффективно удалять алюминий с анода [30]. При циклировании метод обеспечивает быстрое и однородное образование MXene с высокой удельной емкостью и стабильностью.

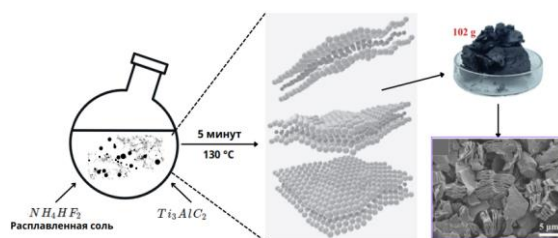


Рисунок 2 – Схема травления MXene с использованием расплавленной соли NH_4HF_2 .

Взято и изменено с [20]

«Зеленые» подходы к синтезу

Стремление к использованию экологически чистых методов синтеза подтолкнуло исследования в области "зеленых" подходов к производству MXene [8]. Методы синтеза, направленные на исключение использования токсичных реагентов, включая фтороводородную кислоту (HF), приобретают все большую актуальность и находят широкое применение в современной науке о материалах [31]. Методы экологически чистого синтеза могут включать использование биологических агентов или природных источников для облегчения процесса травления, что демонстрирует потенциал устойчивого производства ксена в будущем [28]. Например, био-безопасные методы и реакции, в которых используется водопроводная вода или другие безвредные реагенты, подчеркивают сдвиг в сторону снижения воздействия синтеза MXene на окружающую среду при одновременном достижении желаемых свойств материала [15, 28].

Кроме того, такие методы, как синтез с использованием циклов замораживания-оттаивания, демонстрируют высокую эффективность в повышении выхода MXene-материалов при сохранении их уникальных свойств [32]. Этот метод не только исключает использование опасных реагентов, но и способствует формированию структур, обладающих высокой применимостью в таких областях, как накопление энергии и сенсорные технологии [33, 34]. Так же к перспективным «зеленым» стратегиям можно отнести недавно разработанный микроволновой метод синтеза $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene, позволяющий сократить время производства до 90 минут и снизить энергозатраты на 75% по сравнению с традиционными

подходами [35]. Полученные материалы демонстрируют высокую степень кристалличности и улучшенные свойства экранирования электромагнитных помех (до 67 дБ в X-диапазоне), что делает метод перспективным для масштабного и эффективного производства [35].

В последнее время был изучен новый подход к синтезу вольфрамового MXene ($W_2C_xT_y$), основанный на высокотемпературном восстановлении с солевым травлением, что позволило получить стабильный двумерный материал с высокой электро-каталитической активностью в реакции выделения водорода [36]. Этот метод расширяет химическое разнообразие MXene и подтверждает их перспективность для энергетических применений.

В целом, развитие подходов к экологически безопасному синтезу подчеркивает значимость интеграции производства материалов с целями устойчивого развития, открывая возможности для их более широкого применения без ущерба для безопасности и экологической стабильности [8].

Молекулярные свойства

Электрические свойства

MXenes характеризуются исключительной электропроводностью, которая зачастую превосходит таковую у традиционных металлов [37]. Эта выдающаяся особенность объясняется их слоистой структурой, которая способствует эффективной передаче зарядов через слои, что делает их идеальными кандидатами для применения в устройствах хранения энергии, таких как суперконденсаторы и аккумуляторы [38]. Дополнительная настройка электрических свойств посредством модификации поверхности и изменения состава MXenes значительно расширяет их возможности в области электроники [15, 29]. Исследования показали, что MXenes проявляют псевдоемкостные механизмы накопления заряда, обеспечивающие быструю диффузию ионов, что в свою очередь повышает эффективность систем хранения энергии [15, 38]. В обзорной работе было отмечено, что благодаря высокой проводимости и удельной поверхности, MXene демонстрируют ёмкость свыше 700 Ф/г в суперконденсаторах и более 400 мА·ч/г в литий-ионных аккумуляторах при высокой стабильности циклирования [39]. Однако для практического применения остаются актуальными задачи масштабирования синтеза и повышения долговременной стабильности.

Кроме того, взаимодействие между степенью окисления и поверхностными окончаниями, такими как группы $-O$, $-F$ и $-OH$, существенно влияет на ёмкость накопителя заряда. Оптимизация этих групп выводов может привести к улучшению проводимости, тем самым повышая общую производительность электродов на основе MXene [40, 41].

Механические свойства

Механическая прочность MXenes представляет собой ключевую характеристику, определяющую их широкую применимость в различных областях [38]. Благодаря высоким значениям модуля упругости и прочности на растяжение, эти материалы демонстрируют исключительную механическую стабильность, превосходя многие другие двумерные структуры [42]. Их высокая гибкость способствует эффективному интегрированию в композиционные материалы без нарушения структурной целостности матрицы [43].

Экспериментальные исследования подтверждают, что MXenes сохраняют свою структурную целостность при воздействии различных механических нагрузок, что делает их перспективными для использования в гибкой электронике и носимых устройствах [5, 29]. Встраивание MXenes в полимерные матрицы позволяет существенно повысить механические характеристики таких композитов, обеспечивая им повышенную ударопрочность и устойчивость к усталостному разрушению [44].

Тепловые свойства

Теплопроводность MXenes является одним из ключевых параметров, определяющих их потенциал в областях, связанных с управлением тепловыми потоками, включая использование в качестве термоинтерфейсных материалов для электронных устройств [45]. В зависимости от химического состава и структуры, эти материалы могут демонстрировать высокие значения теплопроводности, что способствует эффективному рассеянию и отводу тепла [10, 28]. Многослойная архитектура MXenes способствует эффективному переносу фононов, что играет критическую роль в регулировании температурных режимов при их инженерном применении [46].

Дополнительно, высокая термическая стабильность MXenes делает их перспективными для эксплуатации в условиях повышенных температур, особенно в системах накопления и преобразования энергии [47]. Экспериментальные методы характеристики

позволили определить, что MXenes сохраняют свои свойства при воздействии значительных температур, что обеспечивает их надежность и работоспособность в экстремальных условиях [15,40].

Химические свойства

MXenes обладают замечательной химической реакционной способностью, характеризующейся функциональностью их поверхности, обусловленной процедурами травления, при которых поверхности MXenes соединяются различными группами ($-\text{O}$, $-\text{F}$ и т.д.) [48]. Эти поверхностные группы придают MXenes гидрофильность и изменяют химическое поведение, позволяя им взаимодействовать с различными субстратами и химическими веществами [5,15]. Их высокая площадь поверхности также делает их отличными кандидатами для катализа, накопления энергии и экологических применений, таких как очистка воды [49].

Химическая стабильность MXenes в растворе во многом определяется наличием поверхностных функциональных групп, формирующих защитный слой, препятствующий окислению. Данный факт является важнейшим фактором, определяющим их устойчивость и продолжительный срок службы при длительной эксплуатации в различных средах [33, 41].

Настраиваемость и взаимосвязь структуры и свойств

Взаимосвязь между структурными характеристиками MXenes и их функциональными свойствами предоставляет широкие возможности для целенаправленной оптимизации и практического применения [50]. Различные методы синтеза позволяют контролировать межслойное расстояние и состав поверхностных терминальных групп, что оказывает непосредственное влияние на их электрические, тепловые и механические характеристики [15,41]. Регулируя условия синтеза, можно целенаправленно модифицировать свойства MXenes для конкретных задач, тем самым повышая их эффективность в таких областях, как накопление энергии, каталитические процессы и технологии экологической ремедиации [51].

Кроме того, взаимосвязь между структурой и химическим составом поверхности MXenes играет решающую роль в формировании их эксплуатационных характеристик [52]. Исследования различных химических модификаций позволили выявить эффективные подходы к улучшению таких свойств, как электропроводность и механическая прочность, что подчеркивает возможность целенаправленной настройки их функциональных параметров [5, 15]. Высокая степень настраиваемости MXenes открывает перспективы для дальнейших исследований и разработок, создавая основу для инновационных решений в широком спектре промышленных приложений [53].

Двойные MXene на основе двух переходных металлов (DTM MXene) обладают настраиваемой структурой и улучшенными электрохимическими характеристиками – высокой проводимостью, ёмкостью и стабильностью [54]. Их свойства зависят от сочетания металлов и типа терминальных групп, однако синтез остаётся сложным из-за чувствительности к условиям травления и ограниченной воспроизводимости. Несмотря на это, DTM MXene считаются многообещающими материалами для суперконденсаторов и аккумуляторов.

Защитные и функциональные покрытия

Антикоррозионные свойства

Плотная пластинчатая структура MXenes играет решающую роль в предотвращении проникновения агрессивных веществ, таких как вода, кислород и хлорид-ионы, в материалы подложки [55]. Диспергируя нанолиты MXene в полимерных матрицах или нанося их непосредственно с помощью таких процессов, как нанесение покрытия распылением или электрофоретическое осаждение, исследователи продемонстрировали эффективный «лабиринтный эффект», который расширяет пути диффузии агрессивных веществ [56]. Этот извилистый путь минимизирует риск локальной коррозии за счет снижения скорости переноса ионов, особенно в агрессивных коррозионных средах [57]. Например, было показано, что покрытия на основе MXene на металлических поверхностях снижают проникновение водорода, тем самым значительно замедляя кинетику коррозионных процессов в стальных трубах [57]. В композитных системах прочность поверхности раздела фенол–полимер повышается за счет водородных связей и ковалентных взаимодействий, гарантирующих сохранение целостности покрытия при механических и химических нагрузках [57].

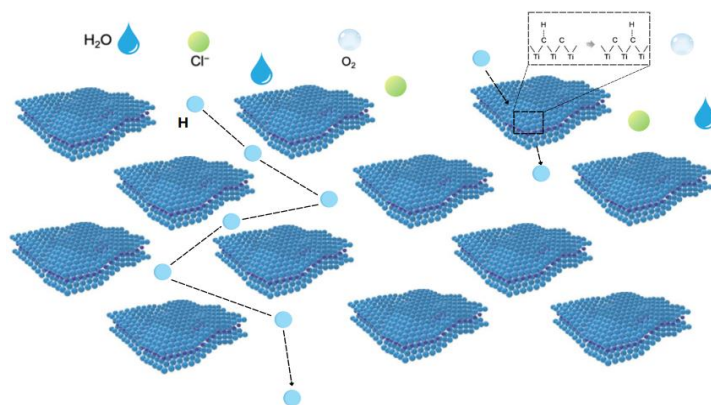


Рисунок 3 – Схема диффузии водорода через MXene принципом лабиринтного эффекта и процесса коррозии. Взято и изменено с [57]

Механические и трибологические усовершенствования

Покрyтия MXene не только предотвращают коррозионное разрушение, но и способствуют обеспечению механического упрочнения [58]. Высокая внутренняя твердость и модуль упругости нанолистов MXene повышают несущую способность и износостойкость композитных покрытий [59]. При введении в эпоксидную или полиуретановую матрицу MXene могут выступать в качестве армирующих наполнителей, которые повышают плотность поперечных связей, что приводит к снижению пластической деформации и повышению стойкости к царапинам [60]. Синергия между нанометрическими размерами MXenes и матрицей покрытия приводит к улучшению характеристик трения и снижению коэффициента трения, что делает эти покрытия хорошо подходящими для применений, требующих длительного срока службы при механических нагрузках [5]. Кроме того, равномерное распределение полимерных наполнителей, чему способствуют модификации поверхности и соответствующие технологии обработки, обеспечивает равномерное распределение напряжений, снижая вероятность распространения трещин [61].

Защита от электромагнитных помех (EMI) и гибкая электроника

В области электронных устройств и устройств связи защита от электромагнитных помех является важным требованием для защиты чувствительных компонентов от электромагнитных помех [62]. Металлическая проводимость и высокое соотношение сторон нанолистов MXene обеспечивают превосходные возможности защиты от электромагнитных помех даже при нанесении в виде ультратонких пленок [63]. Технология послойной сборки облегчает нанесение покрытий MXene с контролируемой толщиной и минимальными дефектами – свойствами, которые обеспечивают эффективное поглощение и отражение электромагнитного излучения [64]. Кроме того, возможность обработки полимеров в водных дисперсиях с использованием масштабируемых технологий, таких как нанесение покрытий распылением или отжимом, позволяет получать покрытия на гибких и растягивающихся подложках [65]. Такие характеристики жизненно важны для носимой электроники следующего поколения и гибких датчиков, где важны как высокая проводимость, так и механическая совместимость [66]. Вдобавок, гибридные пленки из нанопроволоки MXene и серебра были разработаны таким образом, чтобы сочетать превосходную проводимость серебра с надежными механическими характеристиками MXenes, что позволяет получать покрытия с повышенной устойчивостью к воздействию окружающей среды и длительной эксплуатацией в различных условиях окружающей среды [67].

Антибактериальные покрытия и средства против биологического обрастания

Внутренние антибактериальные механизмы

Покрyтия MXene обладают выраженными антибактериальными свойствами, которые делают их привлекательными для медицинского, экологического и промышленного применения. Антибактериальные свойства в значительной степени обусловлены несколькими параллельными механизмами:

1. Физическое разрушение: ультратонкая морфология нанолистов MXene с острыми краями позволяет им проникать через мембраны бактериальных клеток и физически разрушать их. Это механическое вмешательство дестабилизирует целостность клеточной мембраны и, следовательно, приводит к утечке клеток и их гибели [68].

2. Образование активных форм кислорода (АФК): при определенных условиях поверхности MXene могут вызывать окислительный стресс, генерируя АФК. Последующее окислительное повреждение клеточных компонентов, включая липиды, белки и нуклеиновые кислоты, еще больше усиливает бактерицидный эффект [69].

3. Поверхностный заряд и ионные взаимодействия: гидрофильные и отрицательно заряженные поверхностные функциональные группы MXene способствуют сильному электростатическому взаимодействию с положительно заряженными участками бактериальных мембран. Это взаимодействие может нарушить стабильность мембран и привести к лизису клеток [70].

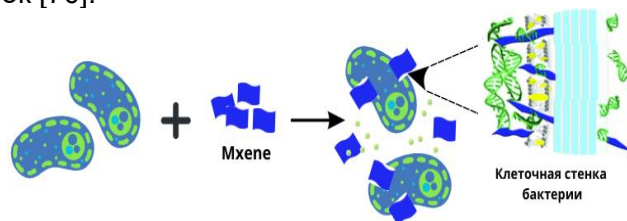


Рисунок 4 – Основной механизм антибактериального действия MXene.

Взято и изменено с [71]

Применение для защиты от биологического обрастания

В дополнение к прямому бактерицидному действию, покрытия MXene, как было показано, устойчивы к образованию биопленок [72], что является критическим требованием в таких областях применения, как очистка воды [73], биомедицинские имплантаты [74] и покрытия для морской техники [75]. Предотвращение биообрастания достигается, в первую очередь, за счет замедленного высвобождения антибактериальных средств [76] и поддержания поверхности, которая менее подвержена адсорбции белков и адгезии микроорганизмов [77]. Например, мембраны из композиционных материалов MXene/целлюлоза демонстрируют долговременный эффект защиты от биообрастания даже при длительном воздействии среды, богатой микробами [78]. Эта эффективность повышается за счет образования жестких кромок, подобных TiO_2 , во время процессов окисления, которые постоянно препятствуют бактериальной колонизации [79]. Кроме того, в динамичных условиях эксплуатации [80] присущая покрытиям MXene гибкость и сминаемость [81] способствуют физическому удалению прилипших микроорганизмов [82], тем самым сохраняя чистоту и функциональную целостность покрытия в течение длительного периода эксплуатации [83].

Функционализация поверхности для повышения активности

Функционализация поверхности, такая как нанесение антибактериальных средств или ингибиторов коррозии на нанолиты MXene, еще больше усиливает их противообрастающую и антибактериальную активность [62]. Ковалентно связывая аминокислоты или другие биологически активные компоненты, поверхность MXene можно адаптировать для улучшения ее взаимодействия с бактериями-мишенями, тем самым повышая бактерицидную эффективность [84]. Такие модификации также улучшают диспергируемость в полимерных матрицах, обеспечивая более однородное покрытие, которое равномерно оказывает антибактериальное действие [83]. Этот подход был реализован в покрытиях для медицинских имплантатов, где как ингибирование бактериальной колонизации, так и стимулирование интеграции клеток-хозяев имеют решающее значение для долгосрочного успеха [44].

Многофункциональные умные покрытия

Интеграция множества функциональных возможностей

Недавние исследования были сосредоточены на разработке покрытий MXene, которые не только защищают подложки, но и обладают дополнительными функциональными возможностями, такими как самовосстановление, чувствительность к деформациям и реагирование на окружающую среду [85]. В этих системах MXene используются в качестве активных наполнителей в полимерных или гибридных матрицах, где их проводящие свойства используются для мониторинга механической деформации или надвигающегося разрушения в режиме реального времени [86]. Например, самовосстанавливающиеся покрытия, усиленные MXene, могут восстанавливать свой защитный барьер после механических повреждений, тем самым продлевая срок службы и снижая затраты на техническое обслуживание [87]. Эти «умные» покрытия реагируют на внешние воздействия, такие как

температура, механическое напряжение или химическое воздействие, динамически изменяя свои свойства.

Сенсорные и биомедицинские применения

Покрyтия МХене также были разработаны для использования в сенсорных системах, в частности в тензодатчиках и биосенсорах [88]. Их способность сохранять электропроводность при механической деформации делает их отличными кандидатами для носимых устройств, которые контролируют физиологические параметры или состояние конструкций [87]. При применении в биомедицинских условиях комбинированные антибактериальные и самовосстанавливающиеся свойства покрытий МХене обеспечивают двойное преимущество: предотвращают инфекцию и одновременно контролируют состояние тканей или прогресс заживления после травмы [89]. Многослойные пленки МХене, осажденные на биосовместимых подложках, продемонстрировали перспективность в области перевязочных материалов, обеспечивая не только защиту от микробного проникновения, но и возможность непрерывного мониторинга процесса заживления с использованием электрических или оптических сигналов. [90]. Вдобавок, по материалам МХене, которые демонстрируют высокую электропроводимость и биосовместимость, также отмечаются перспективы этих материалов в доставке лекарств, генной терапии и интеграции с ИИ для персонализированной медицины [91].

Комбинация с другими наноматериалами

Для дальнейшего повышения multifunctionality полимерных покрытий были разработаны различные гибридные системы с использованием дополнительных наноматериалов, таких как серебряные нанопроволоки, оксид графена или металлоорганические каркасы [67]. Эти композитные покрытия используют синергетические взаимодействия между МХенес и добавленными нанокomпонентами, в результате чего получаются специальные покрытия с оптимизированными электрическими, тепловыми и антибактериальными свойствами [83]. Например, композиты из нанопроволоки МХене и серебра не только усиливают защиту от электромагнитных помех, но и проявляют сильную антибактериальную активность благодаря хорошо известному бактерицидному действию ионов серебра [92]. Такие multifunctional покрытия особенно ценны для применения в суровых или изменчивых условиях эксплуатации, где один слой должен обеспечивать эффективность в нескольких взаимодействующих областях.

Потенциальное использование в материалах МХене в Казахстане

Одно из исследований по материалам синтезируемых из МХене, было посвящено синтезу титана из титанового кальция местного производства, процесс которого включал выборочное травление плавиковой кислотой (HF) для удаления слоя алюминия, в результате чего получались высококачественные двумерные листы МХене [93]. Полученный материал продемонстрировал улучшенные электрохимические характеристики, благодаря которым материал подходит для применения в суперконденсаторах, которые могут сыграть решающую роль в секторе возобновляемых источников энергии и электромобилей Казахстана [93].

В другом исследовании синтезировали бактериальные нанокomпозиты целлюлоза-МХене путем сборки *in situ*, где отрицательно заряженные нанолиты МХене были включены в бактериальную целлюлозную сеть [94]. Этот композит продемонстрировал механическую прочность и антимикробные свойства [94], открыв путь для потенциального применения в области заживления ран и сенсорных технологий, что соответствует растущему биомедицинскому сектору Казахстана.

Кроме того, было исследовано использование титана в качестве катализатора горения твердого топлива на основе перхлората аммония [95]. Использование МХене повысило эффективность сгорания и термическую стабильность, что указывает на потенциальное применение в аэрокосмической и оборонной промышленности Казахстана, особенно в производстве твердого ракетного топлива.

Локализованный синтез полимерных материалов представляет существенное экономическое преимущество для Казахстана и использование отечественного сырья позволяет значительно снизить себестоимость производства. Например, в исследовании [93] подсчитали, что синтез Ti_3AlC_2 из местных прекурсоров обходится всего в 0,22 доллара за грамм, что делает его экономически эффективной альтернативой импортируемым материалам. Развитие технологий на основе МХене может способствовать созданию новых

высокотехнологичных отраслей промышленности, привлечению иностранных инвестиций и укреплению позиций Казахстана в области исследований передовых материалов и их применения.

Заключение

Статья представляет собой всесторонний обзор текущего состояния исследований МХене, подчеркивая их значимость как многофункциональных материалов с уникальными физико-химическими свойствами. Переход от традиционных методов синтеза с использованием фторидов к более экологически безопасным альтернативам, таким как электрохимическое травление и методы с расплавленными солями, отражает глобальную тенденцию к устойчивому развитию в материаловедении. Эти "зеленые" подходы не только снижают экологический ущерб, но и повышают масштабируемость и экономическую эффективность производства МХене, что особенно актуально для промышленного применения. Применение МХене в качестве покрытий и композитов демонстрирует их потенциал в решении широкого спектра задач – от защиты от коррозии и электромагнитных помех до создания антибактериальных и сенсорных систем. Особое значение имеет рассмотрение локального производства МХене в Казахстане, где использование отечественного сырья может способствовать развитию высокотехнологичных отраслей, таких как возобновляемая энергетика, биомедицина и аэрокосмическая промышленность, при этом снижая затраты и укрепляя экономическую независимость. В целом, статья подчеркивает важность дальнейших исследований для оптимизации свойств МХене и расширения их практического применения, что может стать основой для инновационных решений в устойчивом материаловедении.

Список литературы

1. Anasori B. Introduction to 2D Transition Metal Carbides and Nitrides (MXenes) / B. Anasori, Y. Gogotsi // In 2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes); Springer International Publishing: Cham. – 2019. – P. 3-12.
2. Chia X. Characteristics and Performance of Two-Dimensional Materials for Electrocatalysis / X. Chia, M. Pumera // Nature Catalysis. – 2018. – № 1. – P. 909-921. <https://doi.org/10.1038/s41929-018-0181-7>.
3. Ali I. MXenes Thin Films: From Fabrication to Their Applications / I. Ali, M. Faraz Ud Din, Z.-G. Gu // Molecules. – 2022. – № 27. – P. 4925. <https://doi.org/10.3390/molecules27154925>.
4. Effects of Synthesis and Processing on Optoelectronic Properties of Titanium Carbonitride MXene / K. Hantanasirisakul et al // Chemistry of Materials. – 2019. – № 31. – P. 2941-2951. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b00401>.
5. MXene and Polymer Collision: Sparking the Future of High-Performance Multifunctional Coatings / X. He et al // Advanced Functional Materials. – 2024. – № 34. – <https://doi.org/10.1002/adfm.202409675>.
6. BTA-P4444-Lig-Functionalized MXene to Prepare Anticorrosion and Wear-Resistant Integrated Waterborne Epoxy Composite Coating / S. Liu et al // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2024. – № 12. – P. 8247-8260. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c02002>.
7. A Green and Fluorine-Free Fabrication of 3D Self-Supporting MXene by Combining Anodic Electrochemical In Situ Etching with Cathodic Electrophoretic Deposition for Electrocatalytic Hydrogen Evolution / M. Sheng et al // Advanced Materials Technologies. – 2023. – № 9. <https://doi.org/10.1002/admt.202301694>.
8. Towards Greener and More Sustainable Synthesis of MXenes: A Review / T. Amrillah et al // Nanomaterials. – 2022. – № 12. – P. 4280. <https://doi.org/10.3390/nano12234280>.
9. Kumar S. Fluorine-Free MXenes: Recent Advances, Synthesis Strategies, and Mechanisms / S. Kumar // Small. – 2023. – № 20. <https://doi.org/10.1002/smll.202308225>.
10. Recent Advanced Developments and Prospects of Surface Functionalized MXenes-Based Hybrid Composites toward Electrochemical Water Splitting Applications / R. Kulkarni et al // ACS Materials Letters. – 2024. – № 6. – P. 2660-2686. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.4c00034>.
11. MXenes as Emerging Materials: Synthesis, Properties, and Applications / U.U. Rahman et al // Molecules. – 2022. – № 27. – P. 4909. <https://doi.org/10.3390/molecules27154909>.
12. Atomic Scale Design of MXenes and Their Parent Materials-From Theoretical and Experimental Perspectives / J. Zhou et al // Chemical Reviews. – 2023. – № 123. – P. 13291-13322. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00241>.

13. MXene: A Roadmap to Sustainable Energy Management, Synthesis Routes, Stabilization, and Economic Assessment / M. Mim et al // ACS Omega. – 2024. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04849>.
14. Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti_3AlC_2 / M. Naguib et al // Advanced Materials. – 2011. – № 23. – P. 4248-4253. <https://doi.org/10.1002/adma.201102306>.
15. Safe Synthesis of MAX and MXene: Guidelines to Reduce Risk During Synthesis / C.E. Shuck et al // ACS Chemical Health & Safety. – 2021. – № 28. – P. 326-338. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.1c00051>.
16. High-Temperature Behavior and Surface Chemistry of Carbide MXenes Studied by Thermal Analysis / M. Seredych et al // Chemistry of Materials. – 2019. – № 31. – P. 3324-3332. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b00397>.
17. Biswas S. MXene: Evolutions in Chemical Synthesis and Recent Advances in Applications / S. Biswas, P.S. Alegaonkar // Surfaces. – 2021. – № 5. – P. 1-34. <https://doi.org/10.3390/surfaces5010001>.
18. Naguib M. Ten Years of Progress in the Synthesis and Development of MXenes / M. Naguib, M.W. Barsoum, Y. Gogotsi // Advanced Materials. – 2021. – № 33. <https://doi.org/10.1002/adma.202103393>.
19. Delamination of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ Nanosheets with NaCl and KCl for Improved Environmental Stability of MXene Films / M. Shekhirev et al // ACS Applied Nano Materials. – 2022. – № 5. – P. 16027-16032. <https://doi.org/10.1021/acsanm.2c03701>.
20. Ultrafast Synthesis of MXenes in Minutes via Low-Temperature Molten Salt Etching / Y. Wang et al // Advanced Materials. – 2024. – № 36. <https://doi.org/10.1002/adma.202410736>.
21. Etching Mechanism of Monoatomic Aluminum Layers during MXene Synthesis / Y.-J. Kim et al // Chemistry of Materials. – 2021. – № 33. – P. 6346-6355. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.1c01263>.
22. Eutectic Etching toward In-Plane Porosity Manipulation of Cl-Terminated MXene for High-Performance Dual-Ion Battery Anode / M. Zhang et al // Advanced Energy Materials. – 2021. – № 12. <https://doi.org/10.1002/aenm.202102493>.
23. Huang P. Recent Advances and Perspectives of Lewis Acidic Etching Route: An Emerging Preparation Strategy for MXenes / P. Huang, W.-Q. Han // Nano-Micro Letters. – 2023. – № 15. <https://doi.org/10.1007/s40820-023-01039-z>.
24. Kruger D.D. Molten Salt Derived MXenes: Synthesis and Applications / D.D. Kruger, H. García, A. Primo // Advanced Science. – 2024. <https://doi.org/10.1002/advs.202307106>.
25. The Fabrication of Ti_3C_2 and Ti_3CN MXenes by Electrochemical Etching / K.C. Chan et al // Journal of Materials Chemistry A12. – P. 25165-25175. <https://doi.org/10.1039/D4TA03457K>.
26. Element Replacement Approach by Reaction with Lewis Acidic Molten Salts to Synthesize Nanolaminated MAX Phases and MXenes / M. Li et al // Journal of the American Chemical Society. – 2019. – № 141. – P. 4730-4737. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b00574>.
27. Qureshi N. Expediting High-Yield Mxene Carbides and Nitrides Synthesis for Next-Generation 2D Materials / N. Qureshi, C. Choi, J. Doh // Advanced Materials Technologies. – 2023. – № 9. <https://doi.org/10.1002/admt.202301611>.
28. Green Synthesis and Biosafety Assessment of MXene / S. Zhang et al // Small. – 2023. – № 20. <https://doi.org/10.1002/smll.202308600>.
29. Interface Chemistry on MXene-Based Materials for Enhanced Energy Storage and Conversion Performance / X. Hui et al // Advanced Functional Materials. – 2020. – № 30. <https://doi.org/10.1002/adfm.202005190>.
30. Pulsed Electrochemical Exfoliation for an HF-Free Sustainable MXene Synthesis / M. Ostermann et al // Small. – 2025. <https://doi.org/10.1002/smll.202500807>.
31. Universal Strategy for HF-Free Facile and Rapid Synthesis of Two-Dimensional MXenes as Multifunctional Energy Materials / S.-Y. Pang et al // Journal of the American Chemical Society. – 2019. – № 141. – P. 9610-9616. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b02578>.
32. Huang, X. A Facile, High-Yield, and Freeze-and-Thaw-Assisted Approach to Fabricate MXene with Plentiful Wrinkles and Its Application in On-Chip Micro-Supercapacitors / X. Huang, P. Wu // Advanced Functional Materials. – 2020. <https://doi.org/10.1002/adfm.201910048>.
33. Scalable Synthesis of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ -Arginine and Serine-Functionalized Carbon Quantum Dot Microspheres for High Performance Supercapacitors / N. Wang et al // New Journal of Chemistry. – 2023. – № 47. – P. 1993-2002. <https://doi.org/10.1039/d2nj05580e>.

34. Adibah N.A. Synthesis of Ti₃C₂ MXene through In Situ HF and Direct HF Etching Procedures as Electrolyte Fillers in Dye-Sensitized Solar Cell / N.A. Adibah, S.N.A. Zaine, M.F.A. Shukur // Materials Science Forum. – 2021. – № 1023. – P. 15-20. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1023.15>.
35. Energy-Efficient Synthesis of Ti₃C₂T_x MXene for Electromagnetic Shielding / H. Renuka et al // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2025. – № 185. – P. 108966. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108966>.
36. Synthesis of a 2D Tungsten MXene for Electrocatalysis / A. Thakur et al // Nature Synthesis. – 2025. <https://doi.org/10.1038/s44160-025-00773-z>.
37. Roles of Metal Ions in MXene Synthesis, Processing and Applications: A Perspective / Y. Long et al // Advanced Science. – 2022. – № 9. <https://doi.org/10.1002/advs.202200296>.
38. MXenes for Sustainable Energy: A Comprehensive Review on Conservation and Storage Applications / M. Jussambayev et al // Carbon Trends. – 2025. – № 19. – P. 100471. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100471>.
39. Flexible MXene Films for Batteries and Beyond / Y. Huang et al // Carbon Energy. – 2022. – № 4. – P. 598-620. <https://doi.org/10.1002/cey2.200>.
40. Ti₃C₂ MXenes with Modified Surface for High-Performance Electromagnetic Absorption and Shielding in the X-Band / M. Han et al // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2016. – № 8. – P. 21011-21019. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b06455>.
41. Enhanced Oxidation-Resistant and Conductivity in MXene Films with Seamless Heterostructure / W. Qian et al // Small. – 2024. – № 20. <https://doi.org/10.1002/sml.202403149>.
42. Young's Modulus and Tensile Strength of Ti₃C₂ MXene Nanosheets As Revealed by In Situ TEM Probing, AFM Nanomechanical Mapping, and Theoretical Calculations / K.L. Firestein et al // Nano Letters. – 2020. – № 20. – P. 5900-5908. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c01861>.
43. Elastic Properties of 2D Ti₃C₂TX MXene Monolayers and Bilayers / A. Lipatov et al // Science Advances. – 2018. – № 4. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat0491>.
44. Ding M. Ti₃C₂TX MXene@rGo Composite Self-Supporting Membrane and Its Welding Process / M. Ding, X. Zhang, W. Zhang // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – № 2566. – P. 012116. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2566/1/012116>.
45. Synergistical Thermal Modulation Function of 2D Ti₃C₂ MXene Composite Nanosheets via Interfacial Structure Modification / Y. Ouyang et al // iScience. – 2022. – № 25. – P. 104825. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104825>.
46. Li L. MXene Based Nanocomposite Films / L. Li, Q. Cheng // Exploration. – 2022. – № 2. <https://doi.org/10.1002/exp.20220049>.
47. Two-Dimensional MXenes for Electrochemical Energy Storage Applications / P.A. Shinde et al // Journal of Materials Chemistry A. – 2022. – № 10. – P. 1105-1149. <https://doi.org/10.1039/d1ta04642j>.
48. Björk J. Functionalizing MXenes by Tailoring Surface Terminations in Different Chemical Environments / J. Björk, J. Rosen // Chemistry of Materials. – 2021. – № 33. – P. 9108-9118. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.1c01264>.
49. Ihsanullah I. Potential of MXenes in Water Desalination: Current Status and Perspectives / I. Ihsanullah // Nano-Micro Letters. – 2020. – № 12. <https://doi.org/10.1007/s40820-020-0411-9>.
50. Methods of Synthesis, Characteristics, and Environmental Applications of MXene: A Comprehensive Review / J.A. Kumar et al // Chemosphere. – 2022. – № 286. – P. 131607. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131607>.
51. 2D MXene-based Energy Storage Materials: Interfacial Structure Design and Functionalization / R. Fang et al // ChemSusChem. – 2019. – № 13. – P. 1409-1419. <https://doi.org/10.1002/cssc.201902537>.
52. Surface Terminations of MXene: Synthesis, Characterization, and Properties / M. Tang et al // Symmetry. – 2022. – № 14. – P. 2232. <https://doi.org/10.3390/sym14112232>.
53. MXenes: A Promising Material with Multifunctional Applications / D. Dhamodharan et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – № 12. – P. 112316. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112316>.
54. Double Transition Metal MXenes for Enhanced Electrochemical Applications: Challenges and Opportunities / F. Bibi et al // EcoMat. – 2024. – № 6. <https://doi.org/10.1002/eom2.12485>.
55. Ion-Selective Separation Using MXene-Based Membranes: A Review / S. Hong et al // ACS

- Materials Letters. – 2023. – № 5. – P. 341-356. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.2c00914>.
56. Architectural Design and Affecting Factors of MXene-Based Textronics for Real-World Application / Md.R. Repon et al // RSC Advances. – 2024. – № 14. – P. 16093-16116. <https://doi.org/10.1039/d4ra01820f>.
57. MXene Coatings: Novel Hydrogen Permeation Barriers for Pipe Steels / K. Shi et al // Nanomaterials. – 2021. – № 11. – P. 2737. <https://doi.org/10.3390/nano11102737>.
58. Flexible, Ultralight, and Mechanically Robust Waterborne Polyurethane/Ti3C2Tx MXene/Nickel Ferrite Hybrid Aerogels for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding / Y. Wang et al // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2021. – № 13. – P. 21831-21843. <https://doi.org/10.1021/acsmi.1c04962>.
59. Enhancement on the Thermal and Tribological Behaviors of Polyurethane/Epoxy-Based Interpenetrating Network Composites by Orientationally Aligned CNF/MXene/WPU Aerogels / Y. He et al // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2024. – № 187. – P. 108477. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108477>.
60. Recent Advances in MXene/Epoxy Composites: Trends and Prospects / R. Giménez et al // Polymers. – 2022. – № 14. – P. 1170. <https://doi.org/10.3390/polym14061170>.
61. Toughening and Polymerization Stress Control in Composites Using Thiourethane-Treated Fillers / A.P.P. Fugolin et al // Scientific Reports. – 2021. – № 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87151-9>.
62. Recent Advances of MXene-Based Nanocomposites towards Microwave Absorption: A Review / S. Liu et al // Advanced Composites and Hybrid Materials. – 2025. – № 8. <https://doi.org/10.1007/s42114-024-01145-5>.
63. Anomalous Absorption of Electromagnetic Waves by 2D Transition Metal Carbonitride Ti3CNTX (MXene) / A. Iqbal et al // Science. – 2020. – № 369. – P. 446-450. <https://doi.org/10.1126/science.aba7977>.
64. Electromagnetic Interference Shielding Materials: Recent Progress, Structure Design, and Future Perspective / X.-Y. Wang et al // Journal of Materials Chemistry. – 2022. – № 10. – P. 44-72. <https://doi.org/10.1039/d1tc04702g>.
65. Pieters K. Progress in Waterborne Polymer Dispersions for Coating Applications: Commercialized Systems and New Trends / K. Pieters, T.H. Mekonnen // RSC Sustainability. – 2024. – № 2. – P. 3704-3729. <https://doi.org/10.1039/d4su00267a>.
66. Polyaniline/TiO2/MXene Ternary Composites for Enhancing Corrosion Resistance of Waterborne Epoxy Coatings / H. An et al // ACS Applied Nano Materials. – 2024. – № 8. – P. 340-350. <https://doi.org/10.1021/acsnm.4c05723>.
67. Scalable Solution-Processed Fabrication Approach for High-Performance Silver Nanowire/MXene Hybrid Transparent Conductive Films / P. Wang et al // Nanomaterials. – 2021. – № 11. – P. 1360. <https://doi.org/10.3390/nano11061360>.
68. Study on Anticorrosion and Wear Resistance of Self-Healing Coating Based on Functional MXene and Dynamic Disulfide Bond / X. Qiu et al // ACS Applied Polymer Materials. – 2024. – № 6. – P. 11392-11405. <https://doi.org/10.1021/acsapm.4c01983>.
69. Rheological Characteristics of 2D Titanium Carbide (MXene) Dispersions: A Guide for Processing MXenes / B. Akuzum et al // ACS Nano. – 2018. – № 12. – P. 2685-2694. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b08889>.
70. Two-Dimensional Janus MXene Inks for Versatile Functional Coatings on Arbitrary Substrates / M. Chen et al // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2023. – № 15. – P. 4591-4600. <https://doi.org/10.1021/acsmi.2c20930>.
71. Emergent 2D Materials for Combating Infectious Diseases: The Potential of MXenes and MXene–Graphene Composites to Fight against Pandemics / N. Dwivedi et al // Materials Advances. – 2021. – № 2. – P. 2892-2905. <https://doi.org/10.1039/d1ma00003a>.
72. Recent Advances in MXenes Composites for Electromagnetic Interference Shielding and Microwave Absorption / Z. Wang et al // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2020. – № 136. – P. 105956. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105956>.
73. MXene-Based Membranes in Water Treatment: Current Status and Future Prospects / Y. Sun et al // Separation and Purification Technology. – 2024. – № 331. – P. 125640. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125640>.
74. Narayana S V V S. Biofilm Resistant Surfaces and Coatings on Implants: A Review / S V V S Narayana, S V V Srihari // Materials Today: Proceedings. – 2019. – № 18. – P. 4847-4853.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.475>.

75. Graphene-Based Coating to Mitigate Biofilm Development in Marine Environments / F. Sousa-Cardoso et al // *Nanomaterials*. – 2023. – № 13. – P. 381. <https://doi.org/10.3390/nano13030381>.
76. Antimicrobial Nanoparticles Mediated Prevention and Control of Membrane Biofouling in Water and Wastewater Treatment: Current Trends and Future Perspectives / S. Samal et al // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. – 2023. – № 195. – P. 5458-5477. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04497-8>.
77. Learn G.D. Cyclodextrin Polymer Coatings Resist Protein Fouling, Mammalian Cell Adhesion, and Bacterial Attachment / G.D. Learn, E.J. Lai, H.A. von Recum // Cold Spring Harbor Laboratory. – 2020.
78. Nanocellulose-Intercalated MXene NF Membrane with Enhanced Swelling Resistance for Highly Efficient Antibiotics Separation / H. Zhang et al // *Separation and Purification Technology*. – 2023. – № 305. – P. 122425. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122425>.
79. Enhancing Wear Resistance and Mechanical Property of Epoxy Coating via “Roller Wheel” Liquid metal-MXene / S. Zheng et al // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2024. – № 141. <https://doi.org/10.1002/app.55511>.
80. Unleashing the Potential of MXene-Based Flexible Materials for High-Performance Energy Storage Devices / Y. Zhou et al // *Advanced Science*. – 2023. – № 11. <https://doi.org/10.1002/advs.202304874>.
81. Patel P. Flexible MXene Coatings Stay Put on Any Surface / P. Patel // *Chemical & Engineering News*. – 2021. – № 7–7. <https://doi.org/10.47287/cen-09932-scicon3>.
82. Stretchable, Nano-Crumpled MXene Multilayers Impart Long-Term Antibacterial Surface Properties / N. Nagpal et al // Cold Spring Harbor Laboratory, 2023.
83. MXene-Functionalized Light-Induced Antimicrobial and Waterproof Polyacrylate Coating for Cementitious Materials Protection / H. Zhang et al // *Polymers*. – 2023. – № 15. – P. 2076. <https://doi.org/10.3390/polym15092076>.
84. MXene: A Wonderful Nanomaterial in Antibacterial / S. Ye et al // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2024. – № 12. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1338539>.
85. Bio-Inspired Self-Healing MXene/Polyurethane Coating with Superior Active/Passive Anticorrosion Performance for Mg Alloy / X. Li et al // *Chemical Engineering Journal*. – 2023. – № 454. – P. 140187. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140187>.
86. Strain Sensing Coatings for Large Composite Structures Based on 2D MXene Nanoparticles / G. Monastyrckis et al // *Sensors*. – 2021. – № 21. – P. 2378. <https://doi.org/10.3390/s21072378>.
87. Surface-Agnostic Highly Stretchable and Bendable Conductive MXene Multilayers / H. An et al // *Science Advances*. – 2018. – № 4. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aag0118>.
88. MXene Sensors Based on Optical and Electrical Sensing Signals: From Biological, Chemical, and Physical Sensing to Emerging Intelligent and Bionic Devices / L. Wu et al // *Photonix*. – 2023. – № 4. <https://doi.org/10.1186/s43074-023-00091-7>.
89. Flexible, Transparent, and Conductive Ti3C2Tx MXene–Silver Nanowire Films with Smart Acoustic Sensitivity for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding / W. Chen et al // *ACS Nano*. – 2020. – № 14. – P. 16643-16653. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c01635>.
90. MXene-Based Flexible Electronic Materials for Wound Infection Detection and Treatment / Y. Hu et al // *npj Flexible Electronics*. – 2024. – № 8. <https://doi.org/10.1038/s41528-024-00312-4>.
91. MXenes in Healthcare: Synthesis, Fundamentals and Applications / Z.U.D. Babar et al // *Chemical Society Reviews*. – № 54. – P. 3387-3440. <https://doi.org/10.1039/D3CS01024D>.
92. Scalable Production of Catecholamine-Densified MXene Coatings for Electromagnetic Shielding and Infrared Stealth / Z. Deng et al // *Small*. – 2023. – № 19. <https://doi.org/10.1002/smll.202304278>.
93. Evaluation of Perspectives for the Synthesis of Ti3AlC2 in Kazakhstan for Supercapacitor Application / A. Starodubtseva et al // *Chemical Bulletin of Kazakh National University*. – 2024. – P. 4-12. <https://doi.org/10.15328/cb1389>.
94. Synthesis, Properties, and Applications of Nanocomposite Materials Based on Bacterial Cellulose and MXene / A.B. Talipova et al // *Polymers*. – 2023. – № 15. – P. 4067. <https://doi.org/10.3390/polym15204067>.
95. Көркембай ЗН. Ti3C2 (MXene) Katalizator Қатысында Аммоний Перхлораты Negizindegi Қatty Oтынnyң Zhanu Yrdis / ЗН. Көркембай, А.Н. Алибаев, З.А. Мансуров // BULLETIN of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography. Ecology Series. – 2024. – № 149. – P. 67-78. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2024-149-4-67-78>. (In Kazakh).

Благодарность

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992873).

М. Әліпұлы^{1*}, Н.Н. Нұрғалиев², Қ. Асқарұлы¹, Mohammad Khalid³, С. Азат¹

¹Satbayev Univeristy,

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

²Шәкәрім Университеті,

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

³Глазго Университеті,

G12 8QQ, Ұлыбритания, Глазго, Университет даңғылы

*e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com

MXENE МАТЕРИАЛДАРЫ: ЗАМАНАУИ СИНТЕЗ ӘДІСТЕРІ, ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ТАЗА ТӘСІЛДЕР ЖӘНЕ ЖАБЫНДАР МЕН КОМПОЗИТТІК МАТЕРИАЛДАР РЕТІНДЕ ҚОЛДАНУ МҮМКІНДІКТЕРІ

Мақалада МХене, екіөлшемді материалдарды – ауыспалы металдардың карбидтері, нитридтері және карбонитридтерін синтездеудің заманауи әдістеріне шолу жасалған, әсіресе экологиялық тұрғыдан қауіпсіз тәсілдер мен оларды жабындар мен композиттер ретінде қолдану мүмкіндіктеріне баса назар аударылған. Фторлы қосылыстарды, мысалы, фторсутек қышқылын пайдалана отырып жүргізілетін дәстүрлі травление әдістері мен олардың экологиялық қатерлер секілді кемшіліктері қарастырылады. Сонымен қатар, қоршаған ортаға әсерді азайтып, өндірістің ауқымын кеңейтуге мүмкіндік беретін "жасыл" технологиялар – электрохимиялық травление және балқытылған тұздарды қолданатын әдістер сипатталады. МХене материалдарының ерекше қасиеттері – жоғары электрөткізгіштік, механикалық икемділік және гидрофильділік – олардың энергетика, электроника және экология салаларында кеңінен қолданылуына жол ашады. Мақалада МХене материалдарының коррозияға қарсы және бактерияларға қарсы жабындарда, электромагниттік кедергілерден қорғау мен сенсорлық жүйелерде қолданылу әлеуеті ерекше атап өтіледі. Сонымен қатар, Қазақстанда МХене қолдану мүмкіндіктері, соның ішінде жергілікті шикізатты пайдалана отырып суперконденсаторлар, биомедициналық материалдар және аэроғарыштық салаларға арналған катализаторлар өндіру мүмкіндігі талқыланады. Жергілікті синтездің экономикалық тиімділігі жоғары технологиялық салаларды дамыту перспективасын көрсетеді. Бұл жұмыс МХене саласындағы қазіргі жетістіктерді таныстырып, тұрақты материалтану бағыты бойынша болашақ зерттеулерге ынталандыруға бағытталған. Ол осы материалдардың функционалдығы мен экологиялық жауапкершілікті үйлестіре отырып, инновацияларды дамытудағы әлеуетін көрсетеді.

Түйін сөздер: МХене, экологиялық таза әдістер, жабындар, композиттер, коррозияға қарсы қасиеттер, бактерияға қарсы қасиеттер.

M. Alipuly^{1*}, N.N. Nurgaliyev², K. Askaruly¹, Mohammad Khalid³, S. Azat¹

¹Satbayev Univeristy,

050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Satbayev street

²Shakarim University,

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

³University of Glasgow,

G12 8QQ, United Kingdoms, Glasgow, University Avenue

*e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com

MXENE MATERIALS: MODERN SYNTHESIS METHODS, ECO-FRIENDLY APPROACHES, AND PROSPECTS FOR APPLICATION AS COATINGS AND COMPOSITE MATERIALS

This article provides an overview of modern synthesis methods for MXene, a class of two-dimensional materials comprising transition metal carbides, nitrides, and carbonitrides, focusing on eco-friendly approaches and their potential as coatings and composites. It examines traditional fluoride-based etching techniques, such as those using hydrofluoric acid, and their drawbacks, including environmental hazards. In contrast, «green» alternatives like electrochemical etching and molten salt methods are explored, which reduce environmental impact and enhance production scalability. The unique properties of MXene – high electrical conductivity, mechanical flexibility, and hydrophilicity – are highlighted, making them valuable for applications in energy storage, electronics, and environmental remediation. The study emphasizes MXene's prospects in anticorrosion and antibacterial coatings, electromagnetic interference shielding, and sensor systems. Additionally, it discusses MXene's potential in Kazakhstan, leveraging local raw materials for supercapacitors, biomedical applications, and aerospace catalysts. The economic viability of localized synthesis underscores

opportunities for high-tech industry growth. Aimed at elucidating current advancements, the article seeks to inspire further research in sustainable materials science, illustrating how MXene can drive innovation by balancing functionality with ecological considerations, thus paving the way for advanced, environmentally responsible technologies.

Key words: MXene, eco-friendly methods, coatings, composites, anticorrosion properties, antibacterial properties.

Сведения об авторах

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

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

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

Mohammad Khalid – доктор инженерии, Профессор, Университет Глазго, Великобритания; e-mail: Mohammad.khalid@glasgow.ac.uk. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0265-4820>.

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

Авторлар туралы мәліметтер

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

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

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

Mohammad Khalid – инженерия докторы, Профессор, Глазго Университеті, Ұлыбритания; e-mail: Mohammad.khalid@glasgow.ac.uk. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0265-4820>.

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

Information about the authors

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

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

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

Mohammad Khalid – PhD engineering, Professor, Glasgow University, United Kingdoms; e-mail: Mohammad.khalid@glasgow.ac.uk. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0265-4820>.

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

Поступила в редакцию 04.04.2025

Поступила после доработки 02.05.2025

Принята к публикации 05.05.2025