Статья поступила в редакцию: 17.05.2026
Статья принята к публикации: 13.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 620.197.6

Качественная характеристика микрорельефа поверхности эпоксидно-минерального антикоррозионного покрытия методом СЭМ/EDS

Эшкобилов Джамшид Хайитмурод угли
докторант
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: jamshideshqobilov883@gmail.com

Абдукаримов Мирзохид Муратович
д-р техн. наук (DSc)
доц., Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Ёдгоров Нормахмат
д-р хим. наук, проф.
вед. науч. сотр., Институт общей и неорганической химии Академия наук Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: yodgorov@bk.ru

Qualitative SEM/EDS characterization of the surface morphology of an epoxy-mineral anticorrosive coating

Eshqobilov Jamshid Hayitmurod o‘g‘li
Doctoral student
Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Uzbekistan, Tashkent

Abdukarimov Mirzohid Muratovich
doctor of Technical Sciences (DSc)
Associate Professor Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Uzbekistan, Tashkent

Yodgorov Normakhmat
doctor of Chemical Sciences, Professor
Leading Researcher Institute of General and Inorganic Chemistry
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Эшкобилов Д.Х.У., Абдукаримов М.М., Ёдгоров Н. Качественная характеристика микрорельефа поверхности эпоксидно-минерального антикоррозионного покрытия методом СЭМ/EDS // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23556

Аннотация

Цель работы – описать микрорельеф поверхности ранее запатентованного эпоксидно-минерального покрытия (состав 4) и установить пределы интерпретации доступных микроскопических и элементных данных. Состав включает 60 мас.% смеси смол ЭД-20 и каменноугольной (массовое соотношение 1:0,4), 7 мас.% ДТБ-2, 5 мас.% кубовых остатков фурфурилового спирта, 13 мас.% волластонита, 8 мас.% андезитовой муки и 7 мас.% омыленного таллового пека марки Б. Проведен качественный разбор двух поверхностных изображений сканирующей электронной микроскопии (СЭМ; ZEISS, сигнал SE1, 10 кВ, рабочее расстояние 8,5 мм; масштабные метки 200 и 100 мкм) и одного локального спектра энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS). На изученных участках обнаружен неоднородный многоуровневый рельеф; протяженная открытая сеть трещин в пределах двух полей не прослеживается. Спектр регистрирует C, O, Si, Al, Ca, Fe, Mg, Na, K, Ti, P и Mn. При этом источник Fe, Mn и Ti, в том числе возможный вклад стальной подложки, не установлен. Отсутствие сведений о толщине, поперечных срезах, картировании и параметрах количественной обработки EDS исключает выводы об объемной пористости, равномерности наполнителей и рецептурном составе по спектру. Патентные показатели механических испытаний приведены исключительно для описания объекта без статистического сопоставления. Прямые барьерные измерения не выполнялись; причинная связь морфологии с защитными свойствами не установлена. Результаты представляют локальную качественную характеристику поверхности и определяют задачи дальнейшей экспериментальной проверки.

Abstract

The aim was to describe the surface topography of a previously patented epoxy-mineral coating (formulation 4) and explicitly delimit the interpretation of the available microscopy data. The formulation contained 60 wt.% ED-20 epoxy/coal-tar resin blend (1:0.4 mass ratio), 7 wt.% DTB-2 curing agent, 5 wt.% furfuryl-alcohol production bottoms, 13 wt.% wollastonite, 8 wt.% andesite flour and 7 wt.% grade B saponified tall pitch. Two scanning electron microscopy (SEM) surface images (ZEISS, SE1 signal, 10 kV, 8.5 mm working distance; 200 and 100 μm scale bars) and one local energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) spectrum were qualitatively assessed. The examined areas showed heterogeneous multiscale relief, without an extended network of open cracks visible in these two fields. The local spectrum indicated C, O, Si, Al, Ca, Fe, Mg, Na, K, Ti, P and Mn. The origins of Fe, Mn and Ti, including a potential contribution from the steel substrate, could not be established. In the absence of coating-thickness measurements, cross-sections, elemental maps and documented quantitative EDS processing, the data cannot substantiate bulk porosity, filler homogeneity or nominal formulation fractions. Previously published patent test values are used solely as descriptive background, without statistical comparisons. No direct barrier tests were performed, and no causal structure-performance relationship is claimed. The study provides a limited qualitative surface description and defines priorities for further verification.

Ключевые слова: эпоксидно-минеральное покрытие, микрорельеф поверхности, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDS), волластонит, ограничения метода.

Keywords: epoxy-mineral coating, surface morphology, scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), wollastonite, methodological limitations.

Введение

Коррозионное повреждение стальных трубопроводов и монтажных узлов остается одним из факторов, определяющих долговечность и эксплуатационную надежность нефтегазовой инфраструктуры. Барьерные органические покрытия ограничивают доступ воды, кислорода и растворенных ионов к металлической поверхности, однако их защитная способность определяется одновременно химической стойкостью связующего, сплошностью слоя, адгезией и стабильностью межфазных границ при длительном воздействии среды [7, 8].

Эпоксидные системы широко применяются благодаря высокой адгезии к металлам, механической прочности и возможности химического и дисперсного модифицирования. Наряду с традиционными наполненными системами развиваются самовосстанавливающиеся эпоксидные покрытия и подходы к подбору составов с использованием методов анализа данных [9]. Для обычных наполненных покрытий ключевым остается управление состоянием полимерной матрицы, дисперсностью наполнителя и межфазным контактом, поскольку эти факторы могут влиять как на передачу механических напряжений, так и на пути проникновения коррозионно-активной среды [5, 10, 11, 1].

Волластонит представляет интерес как кальций-силикатный наполнитель с анизотропной морфологией. В эпоксидных композитах его рациональное введение может сопровождаться повышением адгезии, твердости и стойкости материала, тогда как агломерация частиц способна формировать локальные дефекты [2, 6]. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDS) позволяют охарактеризовать морфологию поверхности и подтвердить присутствие неорганических элементов, но локальный EDS-спектр не является количественным объемным анализом, а поверхностная микрофотография не заменяет исследование поперечного сечения или оценку пористости [3].

Ранее авторами запатентована композиция на основе ЭД-20, каменноугольной смолы, ДТБ-2, кубовых остатков фурфурилового спирта, волластонита, андезитовой муки и омыленного таллового пека марки Б [4]. Рецептуры и результаты механических испытаний опубликованы в патенте и не являются новым экспериментальным результатом настоящей статьи. Здесь впервые в пределах предоставленного массива описываются два поверхностных СЭМ-поля и один локальный EDS-спектр выбранного состава. Изучение поверхности само по себе не позволяет установить причинную связь между строением слоя и антикоррозионной эффективностью.

Цель работы - выполнить качественное описание микрорельефа и локального элементного сигнала поверхности состава 4, отдельно разграничив непосредственно наблюдаемые признаки, справочные патентные показатели и гипотезы, требующие независимой проверки. Задачи: документировать доступные параметры СЭМ/EDS; описать два поля без экстраполяции на весь объем; проанализировать пределы интерпретации EDS с учетом возможного вклада подложки; обозначить необходимые дополнительные опыты. Сравнение микроструктуры четырех рецептур, оценка объемной пористости и проверка барьерного механизма в задачи работы не входят.

Материалы и методы

Объект исследования и рецептурные данные

Объектом микроструктурного исследования служила ранее разработанная композиция, защищенная патентом Республики Узбекистан UZ IAP 8558 [4]. Во всех четырех вариантах суммарная массовая доля смеси эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 и каменноугольной смолы составляла 60 мас.%, при этом изменялись массовое соотношение смол и содержание ДТБ-2, кубовых остатков фурфурилового спирта, андезитовой муки, волластонита и омыленного таллового пека марки Б. Для устранения неоднозначности общее содержание смеси смол и соотношение ЭД-20: каменноугольная смола в таблице 1 приведены отдельными строками.

Таблица 1. Рецептурные данные четырех составов по патенту UZ IAP 8558 [4]

Компонент / параметр	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4
Общее содержание смеси ЭД-20 + каменноугольная смола, мас.%	60	60	60	60
Массовое соотношение ЭД-20 : каменноугольная смола	1:0,7	1:0,6	1:0,5	1:0,4
Отвердитель ДТБ-2, мас.%	10	9	8	7
Кубовые остатки фурфурилового спирта, мас.%	8	8	8	5
Андезитовая мука, мас.%	7	6	7	8
Волластонит, мас.%	8	9	9	13
Омыленный талловый пек марки Б, мас.%	7	8	8	7

Получение и нанесение покрытия

Согласно патентному описанию [4], расчетное количество смеси ЭД-20 и каменноугольной смолы загружали в двухшнековый смесительный узел, нагревали до 80 °C и перемешивали 1 мин при частоте вращения до 150 об/мин и рабочем давлении до 100 бар. После охлаждения до 50 °C небольшими порциями вводили кубовые остатки фурфурилового спирта, андезитовую муку, волластонит и омыленный талловый пек марки Б; смесь дополнительно перемешивали 5 мин до однородного состояния, после чего непосредственно перед нанесением вводили ДТБ-2.

Покрытия формировали на предварительно подготовленной стальной поверхности, обработанной грунтом-праймером, методом безвоздушного распыления с применением двухкомпонентного аппарата высокого давления WIWA [4]. Отверждение осуществлялось по схеме холодного отверждения. В патентном описании и в доступном массиве данных не указаны марка стали, толщина сухого слоя, число параллельных образцов и статистические характеристики разброса; эти параметры в настоящей статье не реконструируются и не заменяются предположительными значениями.

Физико-механические данные

Численные значения таблицы 2 взяты исключительно из патента [4] и не являются результатами новых испытаний. Описание испытания адгезии соответствует методу отрыва (семейство ISO 4624 / ГОСТ 32299), однако редакция и год стандарта, реально

применявшиеся при получении этих чисел, не подтверждены первичным протоколом. ГОСТ 32299-2025 (ISO 4624:2023) введён в действие в Российской Федерации 01.08.2025; это не позволяет ретроспективно приписать его патентным измерениям. Другие приведённые в источнике обозначения - ГОСТ Р 51164-98, ГОСТ 9.602 и ГОСТ 25812 - не имеют однозначной построчной привязки. Поэтому стандарт для каждого из остальных показателей отмечен как неустановленный. Число повторностей, вариабельность и доверительные интервалы не опубликованы; статистические выводы не выполнялись.

Таблица 2. Ранее опубликованные физико-механические показатели четырех составов

Показатель	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4	Нормативный метод / статус атрибуции
Адгезия к стали методом отрыва, МПа	12,4	12,9	13,0	14,5	Метод отрыва (ISO 4624 / ГОСТ 32299); год редакции не подтверждён
Снижение адгезии после 1000 ч в воде, %	12,0	13,0	12,0	11,0	- (по первичному источнику не установлен)
Катодное отслаивание после 30 суток в 3% NaCl, см²	1,56	1,78	1,56	1,20	- (по первичному источнику не установлен)
Пенетрация при (20±3) °C, мм	0,10	0,09	0,09	0,07	- (по первичному источнику не установлен)
Прочность при разрыве, МПа	39,1	40,4	40,2	42,1	- (по первичному источнику не установлен)

Примечание. Значения взяты из патента [4] без повторностей, стандартных отклонений и доверительных интервалов. Для адгезии указан метод отрыва по семейству ГОСТ 32299 / ISO 4624; точная редакция применённого стандарта не подтверждена протоколом. Для остальных показателей построчная атрибуция стандартов по первоисточнику неустановима. Знак «-» в графе «Стандарт» означает отсутствие подтверждённой привязки, а не отсутствие стандартизованных методов.

Сканирующая электронная микроскопия и EDS-анализ

Два изображения поверхности состава 4 получены на оборудовании производителя ZEISS (Photo No. 7816 и 7817) в режиме регистрации вторичных электронов SE1 при ускоряющем напряжении 10,00 кВ и рабочем расстоянии 8,5 мм; нанесенные масштабные метки - 200 и 100 мкм. Модель прибора, способ пробоподготовки, применение и материал проводящего напыления, числовое увеличение и критерии выбора полей в переданном протоколе отсутствуют. Выбор двух доступных кадров носит документальный, а не случайный или статистически репрезентативный характер. Один локальный EDS-спектр («Спектр 18») рассматривается только как регистрация элементных линий; координаты/ критерий выбора участка, время накопления, единицы и алгоритм нормировки неизвестны. Таким образом, метод нельзя воспроизвести во всех деталях по имеющемуся описанию, что прямо ограничивает интерпретацию.

Таблица 3. Доступные параметры СЭМ/EDS и ограничения воспроизводимости

Параметр	Сведения в доступном экспериментальном массиве
Производитель СЭМ	ZEISS
Модель микроскопа	Не указана в доступном протоколе; не реконструировалась
Режим регистрации	SE1, вторичные электроны
Ускоряющее напряжение	EHT = 10,00 kV
Рабочее расстояние	WD = 8,5 mm
Число анализируемых СЭМ-полей	2 поля поверхности: Photo No. 7816 и 7817
Масштабные метки	200 и 100 мкм; числовое увеличение не зафиксировано (по меткам не реконструируется)
Подготовка образца	Не документирована в доступном протоколе
Проводящий слой	Наличие/отсутствие и материал не документированы
EDS-анализ	Один локальный спектр «Спектр 18»
Выбор точки EDS и время накопления	Критерии выбора участка и время накопления не документированы
Единицы/алгоритм нормировки EDS	Не указаны; численные значения не трактуются как объемный количественный состав
EDS-картирование Ca/Si/Al/Fe	В доступном массиве отсутствует; пространственное распределение и агломерация количественно не оцениваются
Поперечный срез, фрактография, толщина покрытия	В доступном массиве отсутствуют; статья ограничена поверхностной морфологией

На исходном снимке EDS приведены подписи SiO_2, Al_2O_3, Fe, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, TiO_2, P_2O_5 и MnO. Они представляют приборную форму вывода условных оксидных эквивалентов наряду с обозначением Fe как элемента; такой смешанный формат нельзя трактовать как химическую спецификацию фаз. Исходные единицы, способ пересчета элементов в оксиды, нормировка и учет C и O не документированы. Поэтому численные значения с рисунка 3 сознательно не перенесены в таблицу массовых долей и не используются для проверки рецептуры; обсуждаются только идентифицированные элементные линии. Для количественной оценки нужны первичные файлы спектра, параметры калибровки и дополнительные независимые измерения.

Результаты и обсуждение

Выбор состава для микроструктурного исследования

Состав 4 выбран для описания поверхности потому, что его справочные патентные значения составляют: адгезия отрывом 14,5 МПа, снижение адгезии после 1000 ч выдержки в воде 11 %, площадь катодного отслаивания после 30 суток в 3 %-ном NaCl 1,20 см², пенетрация 0,07 мм и прочность при разрыве 42,1 МПа [4]. Это отдельные опубликованные значения без информации о повторяемости. Выбор состава не означает доказанного превосходства по свойствам и не означает, что наблюдаемый поверхностный рельеф является причиной указанных чисел.

Для составов 1-3 изображения СЭМ и карты EDS отсутствуют. Следовательно, сравнение их микроструктуры с составом 4, равно как и оценка изменения распределения наполнителя при переходе между рецептурами, невозможно. Даже номинальные различия патентных показателей нельзя признать статистически значимыми без серии испытаний и параметров разброса. В дальнейшем требуются одинаковый протокол съемки и независимые поля каждого состава.

Морфология поверхности

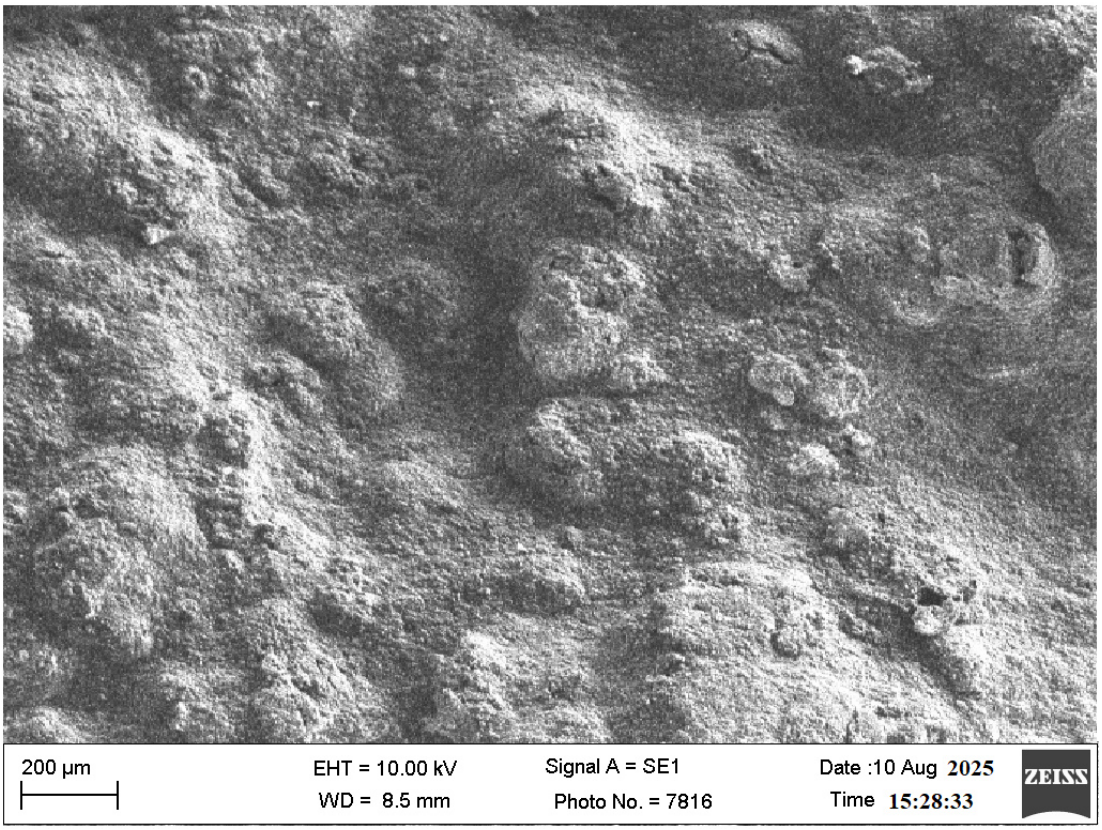

Рисунок 1. Поверхность состава 4: СЭМ, SE1, EHT 10 кВ, WD 8,5 мм, поле Photo No. 7816; масштабная метка 200 мкм

На СЭМ-кадре с масштабной меткой 200 мкм наблюдается выраженный многоуровневый рельеф: участки визуально непрерывной матрицы чередуются с выступающими образованиями неправильной формы размером от десятков до первых сотен микрометров. Такая гетерогенность ожидаема для органо-минеральной композиции, содержащей полимерное связующее, андезитовую муку и волластонит. Термин «плотная структура» для всего объема покрытия по этому изображению не используется, поскольку поверхностный кадр не дает количественной информации о внутренней пористости и сквозных дефектах.

В данном поле не прослеживается развитая сеть протяженных открытых трещин. Это является непосредственно наблюдаемым признаком только для показанного участка поверхности. Отсутствие видимой трещинной сети не эквивалентно доказательству сплошности покрытия по всей толщине и не позволяет количественно оценить проницаемость. Для такого вывода требуются поперечные шлифы, измерение толщины и пористости, а также электрохимические или сорбционные методы.

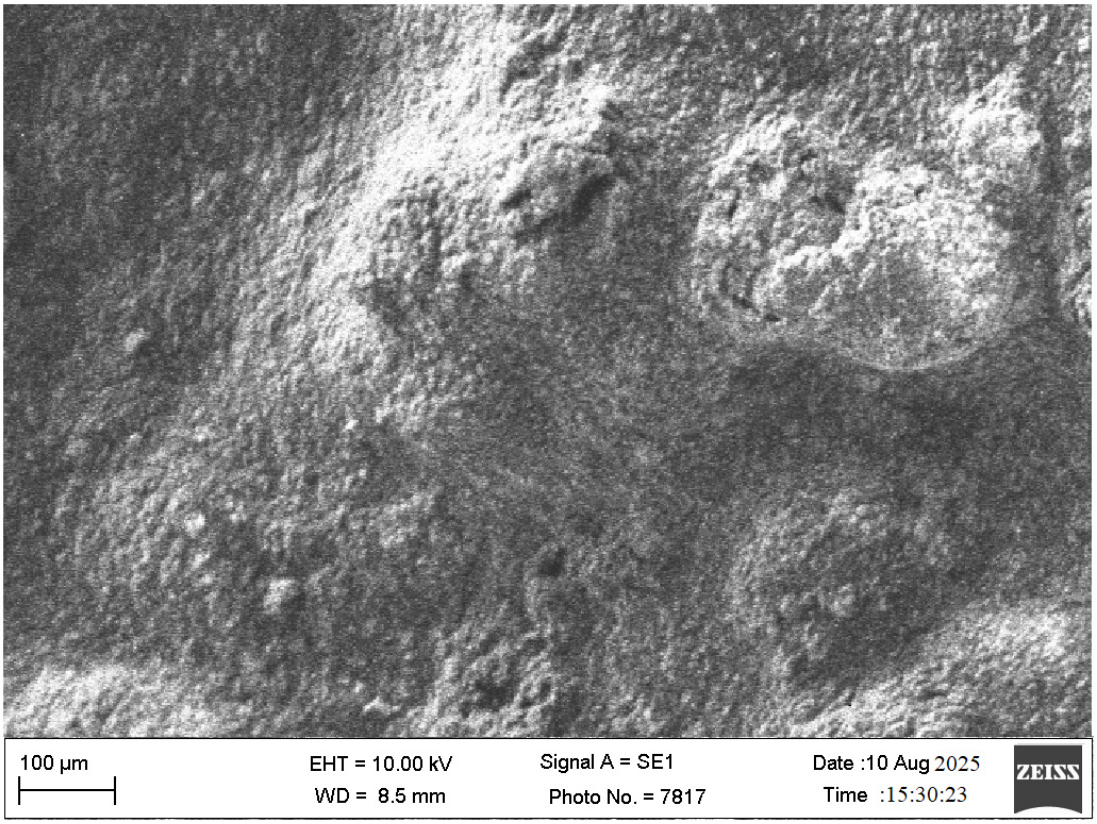

Рисунок 2. Поверхность состава 4: СЭМ, SE1, EHT 10 кВ, WD 8,5 мм, поле Photo No. 7817; масштабная метка 100 мкм

На кадре с масштабной меткой 100 мкм более отчетливо видны контакты рельефных включений с окружающей матрицей. В большинстве наблюдаемых участков не формируются сплошные кольцевые зазоры вокруг крупных включений, однако по одной поверхностной микрофотографии нельзя количественно оценить прочность межфазного сцепления или наличие дефектов в глубине слоя. Для этого необходимы поперечные срезы и/или фрактография; такие данные в доступном экспериментальном массиве отсутствуют.

Игольчатая морфология отдельных частиц волластонита на представленных кадрах не разрешается настолько однозначно, чтобы приписывать конкретные выступы $CaSiO_3$. Поэтому волластонит обсуждается только с учетом рецептуры и регистрации Ca и Si в локальном EDS-спектре. Подобная осторожность необходима, поскольку литературные данные показывают зависимость эффекта волластонита от дисперсности и межфазного контакта [2, 6], а эти параметры непосредственно в данной работе не измерялись.

Локальный элементный состав по данным EDS

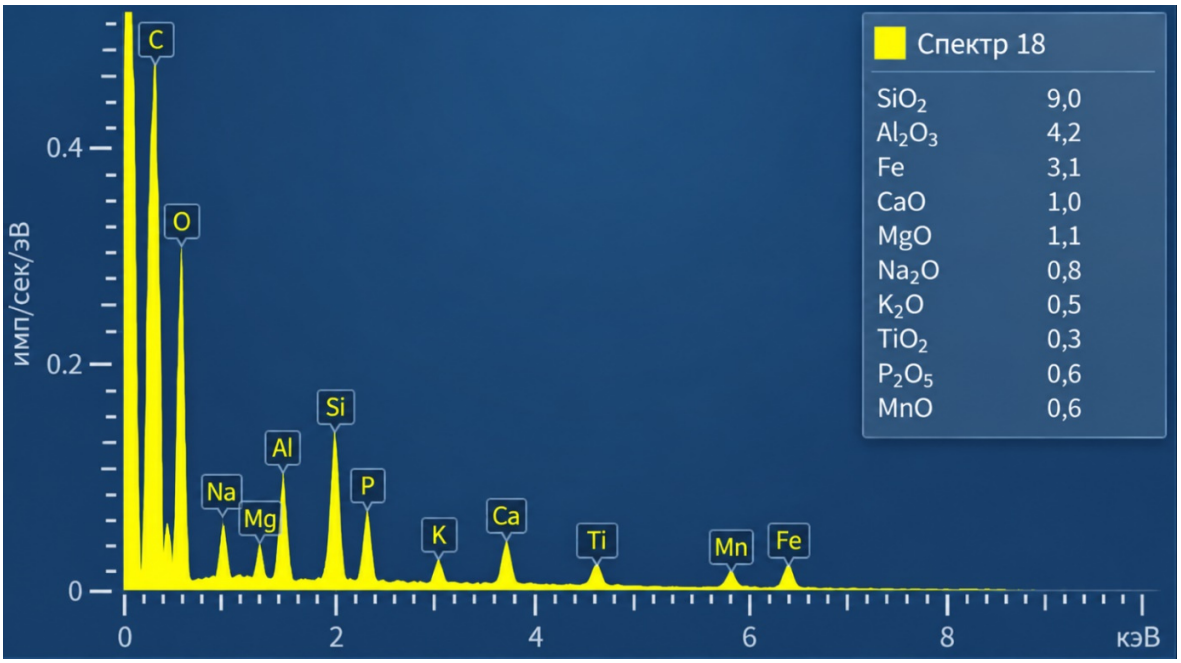

Рисунок 3. Локальный EDS-спектр («Спектр 18»). Подписи оксидов в приборной вставке не представляют подтверждённый фазовый или массовый состав; единицы и нормировка не документированы

В локальном спектре наблюдаются интенсивные линии C и O, а также линии Si, Al, Na, Mg, P, K, Ca, Ti, Mn и Fe. Их совместная регистрация согласуется с органо-минеральной природой анализируемого микрообъёма. По единственному спектру нельзя установить пространственную неоднородность, массовые доли компонентов, распределение наполнителя или степень его агломерации.

Сочетание зарегистрированных Si, Al, Na, K и Mg согласуется с возможным присутствием силикатных и алюмосиликатных компонентов, а Ca и Si - с рецептурным волластонитом. Однако EDS не идентифицирует кристаллические фазы и не доказывает, какой именно частице принадлежат эти сигналы. Источник Fe, Mn и Ti неопределен: возможны составляющие минеральных компонентов, загрязнение либо вклад стальной подложки/межфазной области. Из-за неизвестной толщины покрытия и глубины генерации рентгеновского сигнала при 10 кВ исключить подложку невозможно. Для разрешения вопроса нужны поперечный срез, измерение толщины и локальное картирование с контролем сигналов подложки.

EDS-картирование часто используют для оценки пространственного распределения наполнителя и выявления зон агломерации [3]. Для исследуемой композиции карты Ca, Si, Al и Fe в доступном наборе данных отсутствуют, поэтому пространственная однородность наполнителей в настоящей статье не оценивается. Методически обоснованным следующим этапом является картирование нескольких независимых участков совместно с анализом поперечного сечения; это позволит отделить сигналы наполнителя от возможного вклада подложки и перейти от локальной идентификации элементов к оценке их распределения.

Сопоставление с патентными показателями: пределы допустимых выводов

Два СЭМ-поля описывают только локальную поверхность, а патентные значения характеризуют ранее испытанные образцы; связь каждого показателя с конкретным наблюдаемым участком не проверялась. Без сопоставимых серий образцов, повторных измерений, поперечных срезов и независимых барьерных испытаний причинную зависимость «микрорельеф - адгезия - защитные свойства» установить нельзя. Повышение извилистости пути диффузии в наполненных полимерных материалах рассматривается в литературе как возможная модель [5, 11]. Для представленного покрытия «лабиринтный» барьерный механизм экспериментально не подтверждён.

Справочное патентное значение адгезии 14,5 МПа и указанное снижение на 11 % после 1000 ч выдержки в воде [4] не позволяют оценить статистическую воспроизводимость и не являются прямым измерением проницаемости слоя. Наблюдаемое отсутствие протяженной трещинной сети в двух полях не противоречит сохранению адгезии в опубликованном испытании, однако не подтверждает физическую причину этого результата. Необходимы испытания на одной серии образцов и оценка изменчивости.

Аналогично точечное значение прочности при разрыве 42,1 МПа не доказывает передачу напряжений волластонитовым наполнителем. Из литературных работ известно, что дисперсность и межфазное взаимодействие могут сказываться на свойствах эпоксидных композитов [2, 6, 10], но в настоящем исследовании эти параметры не измерены. Прямые испытания барьерности - электрохимическая импедансная спектроскопия (EIS), сорбция воды, диффузия электролита и проницаемость - отсутствуют. Следовательно, ни преимущество состава 4, ни конкретный антикоррозионный механизм на основании СЭМ/EDS не устанавливаются.

Ограничения и границы интерпретации

Набор первичных данных состоит из двух нерепрезентативных поверхностных СЭМ-полей и одного локального EDS-спектра. Не документированы модель микроскопа, пробоподготовка, покрытие проводящим слоем, числовое увеличение, выбор полей и точки, время накопления и нормировка EDS. Нет карты распределения элементов, поперечного среза, фрактографии, толщины, количественной пористости и сведений о глубине взаимодействия пучка. Поэтому нельзя проверить массовые доли рецептуры, идентифицировать конкретные минеральные частицы, оценить агломерацию, трехмерную сплошность или исключить вклад стальной подложки в Fe, Mn и Ti. Патентные значения механических показателей не имеют доступной статистики, а EIS, водопоглощение и проницаемость не измерены. Для устранения указанных неопределенностей необходимы повторные снимки нескольких образцов всех рецептур, поперечные шлифы, толщинометрия и порометрия, EDS-картирование Ca/Si/Al/Fe/Mn/Ti с полным протоколом, а также реплицированные механические и независимые барьерные испытания. До их выполнения выводы ограничиваются непосредственно зарегистрированными поверхностными признаками.

Заключение

На двух СЭМ-изображениях поверхности запатентованного состава 4 (масштабные метки 200 и 100 мкм) зафиксирован неоднородный многоуровневый рельеф; протяженная открытая сеть трещин в изученных полях визуально не выявлена. Эти наблюдения не позволяют делать выводы о сквозных дефектах, плотности и пористости всего слоя.

Один локальный EDS-спектр показывает линии C, O, Si, Al, Ca, Fe, Mg, Na, K, Ti, P и Mn. Неизвестные параметры количественной обработки и отсутствие элементных карт исключают оценку массовых долей и пространственной однородности. Источники Fe, Mn и Ti не разграничены между наполнителем и возможным вкладом подложки.

Справочные патентные физико-механические показатели не связаны экспериментально с представленной морфологией; статистическое превосходство состава 4 и «лабиринтный» барьерный механизм не доказаны. Следующий этап - полноценный документированный СЭМ/EDS-анализ серии образцов и поперечных срезов в сочетании с измерениями толщины, пористости, EIS, водопоглощения и повторными механическими испытаниями.

Практическое значение полученных наблюдений состоит в документировании двух характерных поверхностных участков выбранной рецептуры и постановке проверяемых задач для дальнейших исследований. Достоверность защитной эффективности и воспроизводимость наблюдаемой морфологии могут быть оценены только после независимых испытаний; в настоящей работе такие выводы не заявляются.

Список литературы

1. Шайкулов, Б.К. Исследование сополимера акрил-стирол-уретан / Б.К. Шайкулов, Ф.Н. Нуркулов, А.Т. Джалилов // Universum. – 2022. – С. 33–37.
2. Мишагин, К.А. Эпоксидные материалы, наполненные синтетическим волластонитом на основе цеолитсодержащей кремнистой породы / К.А. Мишагин, Е.М. Готлиб, А.Р. Валеева, Е.С. Ямалеева // Труды ВИАМ. – 2026. – № 2 (156). – С. 107–116. – DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-107-116.
3. Самарджия М., Стоянович И. Вукович Домановац М., Алар В. Samardžija M., Stojanović I., Vuković Domanovac M., Alar V. Epoxy Coating Modification with Metal Nanoparticles to Improve the Anticorrosion, Migration, and Antibacterial Properties // Coatings. – 2023. – Т. 13, № 7. – Art. 1201. – DOI: 10.3390/coatings13071201.
4. Эшкобилов, Дж. Х. угли. Полимерная композиция для получения коррозионностойкого покрытия: патент Респ. Узбекистан UZ IAP 8558 / Дж. Х. угли Эшкобилов, М.М. Абдукаримов, Н. Ёдгоров, Ф.Н. Нуркулов. – Заявл. 21.05.2026; опубл. 25.06.2026, Бюл. № 6 (302).
5. Anwar S., Li X. A review of high-quality epoxy resins for corrosion-resistant applications // Journal of Coatings Technology and Research. – 2024. – Т. 21, № 2. – P. 461–480. – DOI: 10.1007/s11998-023-00865-5.
6. Dordane R., Doroodmand M.M. Novel method for scalable synthesis of wollastonite nanoparticle as nano-filler in composites for promotion of anti-corrosive property // Scientific Reports. – 2021. – Т. 11. – Art. 2579. – DOI: 10.1038/s41598-021-81875-4.

7. Farh H.M.H., Ben Seghier M.E.A., Zayed T. A comprehensive review of corrosion protection and control techniques for metallic pipelines // Engineering Failure Analysis. – 2023. – T. 143. – Art. 106885. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106885.
8. Jomy J., Prabhu D., Prabhu P.R. Inhibitors Incorporated Into Water-Based Epoxy Coatings on Metals for Corrosion Protection: A Review // Journal of Bio- and Tribo-Corrosion. – 2022. – T. 8. – DOI: 10.1007/s40735-022-00643-7.
9. Liu T., Chen Z., Yang J., Ma L., Mol A., Zhang D. Machine learning assisted discovery of high-efficiency self-healing epoxy coating for corrosion protection // npj Materials Degradation. – 2024. – T. 8. – DOI: 10.1038/s41529-024-00427-z.
10. Patil H.A., Maske V.A., More A.P. Synthesis and Characterization of Eco-Friendly Epoxy Resins and Novel Fillers for Enhanced Corrosion Protection of Mild Steel // Polymers for Advanced Technologies. – 2024. – T. 35, № 12. – DOI: 10.1002/pat.70027.
11. Verma C., Rhee K.Y., Alfantazi A. Functionalized epoxy resins for enhanced interface properties and corrosion resistance: Tailoring of surface and interface properties and performance // Applied Surface Science Advances. – 2025. – T. 25. – Art. 100685. – DOI: 10.1016/j.apsadv. 2024.100685.

References

1. Shaykulov B.K., Nurkulov F.N., Jalilov A.T. Investigation of the acrylic-styrene-urethane copolymer // Universum journal. – 2022. – No. 8 (98). – P. 33–37.
2. Mishagin K.A., Gotlieb E.M., Valeeva A.R., Yamaleeva E.S. Epoxy materials filled with synthetic wollastonite based on zeolite-containing siliceous rock // Proceedings of VIAM. – 2026. – No. 2 (156). – P. 107–116. – DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-107-116.
3. Samardžija M., Stojanović I., Vuković Domanovac M., Alar V. Samardžija M., Stojanović I., Vuković Domanovac M., Alar V. Epoxy Coating Modification with Metal Nanoparticles to Improve the Anticorrosion, Migration, and Antibacterial Properties // Coatings. – 2023. – Vol. 13, No. 7. – Art. 1201. – DOI: 10.3390/coatings13071201.
4. Eshqobilov J.H. o‘g‘li, Abdukarimov M.M., Yodgorov N., Nurqulov F.N. Polymer composition for producing a corrosion-resistant coating. Patent of the Republic of Uzbekistan UZ IAP 8558. – Registered 21 May 2026; published 25 June 2026, Bulletin No. 6(302).
5. Anwar S., Li X. A review of high-quality epoxy resins for corrosion-resistant applications // Journal of Coatings Technology and Research. – 2024. – Vol. 21, No. 2. – P. 461–480. – DOI: 10.1007/s11998-023-00865-5.
6. Dordane R., Doroodmand M.M. Novel method for scalable synthesis of wollastonite nanoparticle as nano-filler in composites for promotion of anti-corrosive property // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – Art. 2579. – DOI: 10.1038/s41598-021-81875-4.
7. Farh H.M.H., Ben Seghier M.E.A., Zayed T. A comprehensive review of corrosion protection and control techniques for metallic pipelines // Engineering Failure Analysis. – 2023. – Vol. 143. – Art. 106885. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106885.

8. Jomy J., Prabhu D., Prabhu P.R. Inhibitors Incorporated Into Water-Based Epoxy Coatings on Metals for Corrosion Protection: A Review // Journal of Bio- and Tribo-Corrosion. – 2022. – Vol. 8. – DOI: 10.1007/s40735-022-00643-7.
9. Liu T., Chen Z., Yang J., Ma L., Mol A., Zhang D. Machine learning assisted discovery of high-efficiency self-healing epoxy coating for corrosion protection // npj Materials Degradation. – 2024. – Vol. 8. – DOI: 10.1038/s41529-024-00427-z.
10. Patil H.A., Maske V.A., More A.P. Synthesis and Characterization of Eco-Friendly Epoxy Resins and Novel Fillers for Enhanced Corrosion Protection of Mild Steel // Polymers for Advanced Technologies. – 2024. – Vol. 35, No. 12. – DOI: 10.1002/pat.70027.
11. Verma C., Rhee K.Y., Alfantazi A. Functionalized epoxy resins for enhanced interface properties and corrosion resistance: Tailoring of surface and interface properties and performance // Applied Surface Science Advances. – 2025. – Vol. 25. – Art. 100685. – DOI: 10.1016/j.apsadv.2024.100685.