

Обзорная статья

УДК 547.057

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-218-226>

CC BY 4.0

Современные стратегии формирования полимерных покрытий. Часть III¹⁾

Ирина Николаевна Вихарева* , Вячеслав Евгеньевич Антипин 

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: vikharevain@susu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Покрытия на твердых материалах широко используются во многих отраслях промышленности. Технологии нанесения покрытий способствуют предотвращению или уменьшению коррозии, загрязнения и биообрастания, химической и структурной деградации, износа внешних поверхностей из-за воздействия элементов и природных условий. Спектр используемых материалов для функциональных покрытий достаточно широкий: от органических полимеров до гибридных композитов и неорганических наночастиц в зависимости от желаемых свойств и функциональности конечного продукта. Несмотря на отличные антикоррозионные характеристики непolyмерных покрытий, их использование наносит экологический ущерб. Наиболее широкое применение получили органические покрытия. Такие составы наносят в жидкой форме, органические растворители в них являются одним из основных компонентов. Экологические требования способствовали разработке альтернативных технологий. Доступность сырья и стоимость экологически чистого покрытия являются основными направлениями разработок. **Основная часть.** В обзоре обоснована актуальность исследований по разработке многофункциональных покрытий на основе полимеров. Представлен рынок полимерных покрытий. Приведены методы защиты поверхности, типы формируемых покрытий, их основные компоненты, особенности формирования покрытий, влияние различных факторов на формирование полимерных покрытий, включая методы подготовки и предварительной обработки защищаемой поверхности. Подробно рассмотрены методы предотвращения коррозии, а также основные направления в разработке антикоррозионных покрытий, основанные на различных защитных механизмах. Приведены характеристики основных компонентов защитных покрытий. Подробно рассмотрен вопрос разрушения полимерных покрытий в зависимости от среды эксплуатации. Рассмотрены типы сред, их влияние и механизмы действия на защищаемые объекты. Перечислены факторы и механизмы разрушения полимерных покрытий, методы предотвращения деградации покрытий. Выделены новейшие технологии формирования защитных полимерных покрытий. **Заключение.** В настоящее время покрытия обеспечивают широкий спектр качественных показателей. Важной характеристикой современных покрытий является минимальное негативное воздействие на окружающую среду, что требует комплексного подхода к проектированию и производству покрытий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: адгезия, защита, коррозия, покрытие, полимер, растворитель, терморезистивная смола.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Вихарева И.Н., Антипин В.Е. Современные стратегии формирования полимерных покрытий. Часть III // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 3. С. 218–226. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-218-226>. – EDN: CYSLIB.

3. РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Разрушение органических покрытий может быть поверхностным в виде косметических дефектов и дефектов, приводящих к коррозии. Важным аспектом разработки высокоэффективных антикоррозионных систем покрытий являются исследование взаимодействия между компонентами покрытий и изучение фундаментальных физических

и химических механизмов деградации покрытий во время эксплуатации [225].

Антикоррозионные покрытия подвергаются воздействию различных сред и факторов: воды, почвы, атмосферы и ультрафиолетового излучения. Конкретные требования к системам покрытий определяются в основном факторами окружающей среды и элементов, взаимодействующих с покрытием во время эксплуатации, а также временем их воз-

¹⁾ Окончание. Часть I, II опубликованы в журнале «Нанотехнологии в строительстве». 2024. Т. 16. № 1, № 2.

© Вихарева И.Н., Антипин В.Е., 2024

действия. Например, покрытия в промышленном секторе подвергаются воздействию химикатов и дождя, тогда как покрытия, зарытые в почву, взаимодействуют с бактериями и влагой.

3.1. Классификация сред

В процессе эксплуатации на антикоррозионные покрытия воздействуют среды с различной агрессивностью. Классификация условий окружающей среды по типу воздействия приведена в ГОСТ 34667.5-2021 (ISO 12944-5:2019) «Материалы лакокрасочные. Защита стальных конструкций от коррозии при помощи лакокрасочных систем» [226]. Стандарт описывает воздействие окружающей среды на конструкции из стали, находящиеся в атмосфере, погруженные в воду или заглубленные в грунт. В стандарте представлена система классификации, основанная на категориях коррозионной активности для разных условий окружающей среды. Классификация условий окружающей среды необходима для выбора защитных систем.

Атмосферная коррозия – процесс, происходящий на металлической поверхности при действии влаги воздуха. Скорость коррозии увеличивается под воздействием следующих факторов:

- при увеличении влажности воздуха;
- при образовании конденсата;
- при увеличении количества загрязнений в атмосфере агрессивные загрязняющие вещества вступают в реакцию с подложкой и образуют отложения на поверхности.

Интенсивно коррозия развивается при относительной влажности воздуха выше 80% и температуре выше 0 °С. При высокой загрязненности воздуха или присутствии гигроскопичных солей коррозия возникает и при более низкой влажности.

Климат определяет влажность и температуру воздуха. В холодном или сухом климате коррозионные процессы замедлены. Наиболее высокая коррозионная активность наблюдается в жарком, влажном и морском климате. Определяющим фактором служит период влажности – время воздействия высокой влажности на конструкцию.

На коррозионные процессы влияет размещение элементов конструкции. Конструкции на открытом воздухе испытывают разные климатические условия и циклы: дождь, солнце, загрязняющие вещества в виде газов, аэрозолей и т.п. Наличие укрытия сглаживает воздействие климатических факторов. В закрытом помещении атмосферное загрязнение практически отсутствует, но скорость коррозии может увеличиваться из-за недостаточной вентиляции, высокой влажности воздуха и образования конденсата.

В условиях окружающей среды коррозионная агрессивность по сравнению с промышленной атмосферой и морским климатом довольно низкая. Промышленные среды характеризуются высокой концентрацией твердых частиц в атмосфере, сажи, песка и сульфатных солей. Дождь с высоким содержанием диоксида серы в атмосфере образует кислотные дожди, и покрытие попадает в кислую среду. Морская атмосфера характеризуется очень высоким содержанием агрессивных ионов Cl^- , вызывающих точечную коррозию.

На скорость коррозионных процессов *в воде* влияют:

- тип воды – пресная, солоноватая или соленая;
- концентрация кислорода в воде;
- тип и концентрация растворенных в воде веществ;
- температура воды.

Ускоряют коррозию подводные флора и фауна.

Выделяют три разные зоны погружения конструкций в воду:

- подводная зона;
- промежуточная (или с колебанием уровня) зона, уровень воды на конструкции меняется из-за естественных или искусственных факторов, увеличивающих коррозию из-за комбинированного воздействия воды и атмосферы;
- зона брызг и переменного смачивания, смачиваемая волнами и брызгами конструкция испытывает высокое коррозионное напряжение, особенно при действии морской воды.

Зона брызг представляет собой чрезвычайно агрессивную среду, поскольку сочетает богатую кислородом атмосферу и непрерывные брызги электролитов из моря. Дegradaция покрытий в зоне брызг ускоряется под действием ультрафиолетового излучения и механического напряжения, вызванного постоянным чередованием периодов влаги и сухости.

Коррозия в грунте зависит от типа почвы и определяется содержанием минеральных веществ, их видов, наличием в грунте органических веществ, содержанием воды и кислорода, от степени аэрации, наличием бактерий.

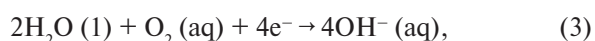
Конструкции, погруженные в воду или зарытые в почву, могут пострадать от песка, гравия или камней, биообрастания.

3.2. Механизмы деструкции

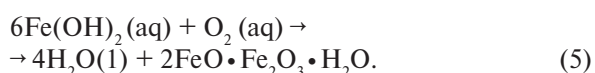
Коррозия – процесс, возникающий при физико-химическом взаимодействии металла с окружающей средой. Для протекания коррозионных процессов необходим раствор электролита и металлический проводник между двумя отдельными областями с разными потенциалами, то есть анодом и катодом. Помимо железа и стали, другими примерами про-

дуктов коррозии являются зеленая патина на меди и белая ржавчина на цинке.

В результате коррозионных процессов на стальной подложке образуются анодные и катодные области. На катоде кислород восстанавливается на каталитически активной поверхности окисленного металла преимущественно до гидроксоионов (реакция 3), но могут образовываться и другие продукты реакции, такие как пероксиды, супероксиды и радикалы. На аноде происходит несколько реакций коррозии, результатом которых является образование ионов Fe^{2+} и электронов (реакция 4).



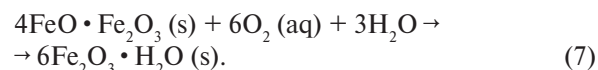
Затем гидроксид железа (II) окисляется в оксиды железа с образованием зеленого гидратированного магнетита: $FeO \cdot Fe_2O_3 \cdot H_2O$:



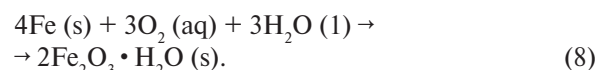
Гидратированный магнетит нестабилен и разлагается на черный магнетит:



В присутствии кислорода черный магнетит окисляется в стабильный красно-коричневый гидратированный гематит ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$), называемый ржавчиной.



Общая реакция



Движущей силой коррозии (рис. 14) для стали является разность потенциалов между анодным и катодным участками. Общий потенциал электрического равновесия гальванического элемента определяется разницей стандартных потенциалов между анодной и катодной реакциями полуэлемента: E_{Ox}^0 и E_{Red}^0 соответственно.

3.3. Факторы деструкции

В атмосферных условиях покрытие подвергается воздействию различных факторов, что приводит к образованию косметических дефектов: потере блеска, изменению цвета и мелению. Большинство

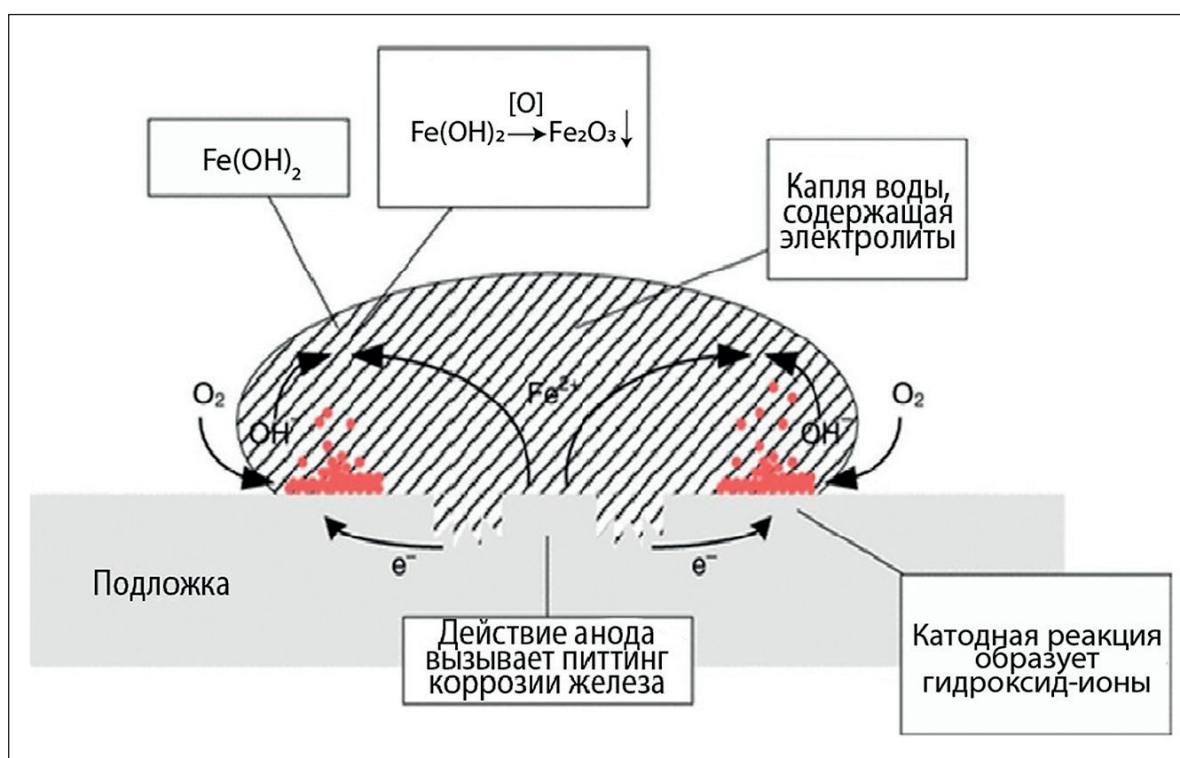


Рис. 14. Схема коррозионных процессов на стали

косметических дефектов вызвано разложением связующего под действием УФ-излучения [227–228]. Более серьезными проблемами являются трещины в покрытии и потеря адгезии.

Поскольку снижение адгезии происходит до наступления коррозии, важно знать механизмы, ответственные за снижение адгезии между органическим покрытием и металлической подложкой [229]. Например, в атмосферных условиях цинковые покрытия могут отслаиваться из-за несоблюдения условий отверждения, что в дальнейшем приводит к нарушению защиты от коррозии. Механизм, ответственный за снижение адгезии, – «мокрая адгезия», т.е. адгезия покрытия к металлической подложке в присутствии воды [229]. Водяные пары в конечном итоге всегда проникают через покрытие. Молекулы воды на границе раздела между покрытием и подложкой связывают ионы водорода и нивелируют силы сцепления между покрытием и оксидами металлов [230]. Выдерживать гидролиз в течение длительного периода времени пригодно небольшое количество полимер-металлических связей. Таким образом, во влажной среде адгезия слабеет, на границе раздела образуется раствор электролита, в результате коррозионные процессы инициируются. С помощью методов FTIR-MIR определена толщина безопасного слоя воды, а также обнаружено, что этот слой накапливается с увеличением потенциала. Для ингибирования накопления воды необходимо несколько слоев покрытия [231–233]. Процесс накопления воды на границе раздела покрытие-подложка подтвержден исследованиями водопоглощения в прилегающих и свободных пленках. Водопоглощение в прилегающих областях покрытий выше, чем в соответствующих свободных пленках [234]. Основываясь на величинах энергий взаимодействий металл-адгезия (в диапазоне около 25 кДж/моль или ниже) и взаимодействий металл-вода (энергии связи в диапазоне 40–65 кДж/моль), вытеснение покрытия водой вполне вероятно [235].

3.4. Типы деструкции

Нитевидная коррозия

В условиях влажной атмосферы актуальным механизмом деградации металлов с органическим покрытием является нитевидная коррозия. Хотя нитевидная коррозия часто наблюдается на алюминиевых деталях с органическим покрытием, исключение не составляет и магниевая и холоднокатаная сталь. Нитевидная коррозия обычно возникает на микроскопических царапинах или дефектах покрытия. Нитевидная коррозия обычно является поверхностной и представляет собой тонкие нитевидные налеты, особенно прогрессирующие под покрытием вдоль поверхности. Коррозионные нити можно рассматривать как коррозионную головку, за которой следует хвост, представляющий собой пористые продукты коррозии. Кислород действует исключительно на активную коррозионную головку [236]. Наблюдается дифференциальная аэрация, поскольку кислород и вода поступают к коррозионной головке посредством диффузии через пористый хвост [237]. Единственным эффективным методом предупреждения нитевидной коррозии является обезвоживание головки нити путем снижения относительной влажности примерно до 60%. Несколько слоев покрытия, низкое пропускание водяного пара и наличие ингибиторов замедляют, но не предотвращают нитевидную коррозию в средах, где влажность невозможно контролировать.

Деградация погруженных покрытий

В системах с погруженными органическими покрытиями наиболее важными и распространенными формами видимого разрушения являются образование пузырей и расслоение (рис. 15). Различное взаимодействие гидроксильных ионов с металлической подложкой приводит либо к катодному вздутию

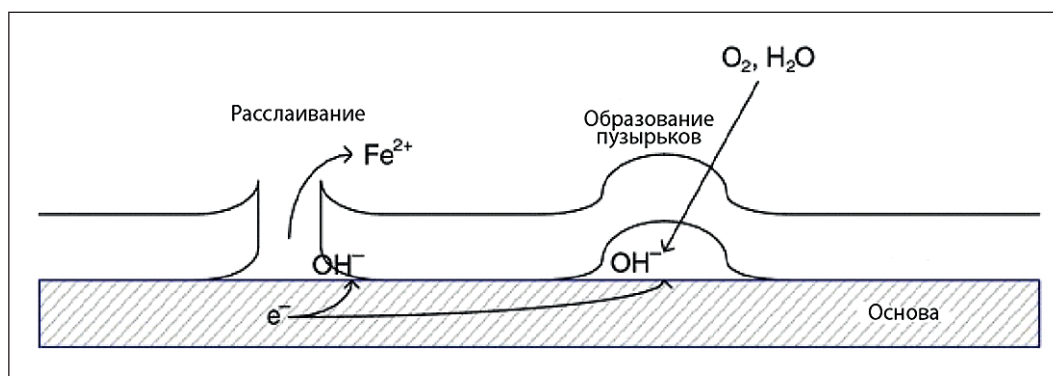


Рис. 15. Эскиз расслоения и вздутия покрытия

либо к катодному расслоению. Образование пузырей является результатом осмотического давления ввиду высокой растворимости в воде продуктов катодной реакции. В результате образующейся щелочной среды благодаря наличию продуктов катодной реакции происходит разрыв связей на границе раздела покрытие-металл, что приводит к расслоению.

Щелочная среда под отслаивающимся покрытием и в катодных областях связана с основными коррозионными процессами стали в морской воде. Наличие дефектов в защитном покрытии способствует более активному воздействию окружающей среды на сталь. Так происходит образование гальванической ячейки с анодной и катодной областями. Сталь растворяется в анодной области. Затем окисленные металлы катализируют катодные реакции, анодная реакция уравнивается катодной реакцией. В естественных условиях катодная реакция будет включать восстановление кислорода [238].

Катодное расслоение

В случае антикоррозионного покрытия с дефектами на практике коррозия начинается гораздо быстрее, чем для бездефектного покрытия. Основные принципы катодного расслоения в целом описаны [239]. Считают, что причиной расслоения является так называемая катодная поляризация, вызванная действием гидроксильных ионов или химическими реакциями. Необходимые для деполяризации катодной области кислород и вода проникают через покрытие или вдоль границы раздела покрытие-подложка. Затем диффундирующий к поврежденным участкам кислород вступает в реакцию окисления $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$.

Исследователями большое внимание уделено изучению транспорта воды, кислорода и катионов через органические покрытия на металлическую подложку. Показано, что типичные органические покрытия достаточно проницаемы для воды и кислорода, поэтому не способны ингибировать расслоение [240–241]. Перенос ионов из окружающей среды на поверхность металла осуществляется по дискретным каналам с низким сопротивлением в покрытии. Присутствие ионов щелочных металлов и OH-ионов приводит к образованию щелочной среды под покрытием и в катодном участке pH может достигать 12–14 [242–243]. Диффузия катионов для нейтрализации заряда гидроксильных ионов обычно является лимитирующим этапом. Доказано, что перенос катионов вдоль границы раздела покрытие-сталь происходит намного быстрее, чем через покрытие. Расслоение покрытия контролируется диффузией катионов [244–245]. Подтверждает эту гипотезу зависимость скорости расслоения от гидратированного размера

катионов. Однако незначительное изменение скорости расслоения в более стабильном эпоксидном покрытии, модифицированном силаном, показало, что сам по себе межфазный транспорт не определяет скорость катодного расслоения.

В катодных блистерах под покрытием высокая щелочность является причиной деградации покрытия. Однако точный механизм пока не описан. Механизмы потери сцепления между подложкой и покрытием в щелочной среде согласно работе [246] можно разделить на три группы: «уменьшение оксидного слоя, химическая деградация полимера, межфазный перелом». Первый путь образования областей расслоения является предпочтительным [246]. На основании этого механизма описана деградация эпоксидных и термоотверждаемых акриловых и полибутадиеновых покрытий на катодно-защищенной стали. Согласно диаграмме, такие процессы вполне предсказуемы для железа при $pH = 14$ и при катодных потенциалах менее 960 мВ СВП. Измерения *in situ* рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией подтвердили, что в щелочной среде значительное восстановление оксида железа возможно только при катодных потенциалах менее 800 мВ СВП [247–248].

Полимерная матрица покрытия при эксплуатации подвергается химическому разложению, при повышенных pH происходит омыление. Подобные случаи описаны с покрытиями на основе полиэтилена, полибутадиена и эпоксидных смол на катоднозащищенной стали [249]. Например, разложение путем омыления в случае покрытий из полибутадиена ускоряется при $pH > 11,8$. Исследования показали, что область первоначального разрушения полимерного покрытия находится вблизи поверхности металла [250]. Образующиеся при восстановлении кислорода радикалы HO_2^- , OH^- и O_2^- являются основным фактором деградационных процессов органического слоя [251].

Схемы механизмов катодного расслоения, основанные на литературных данных, приведены на рис. 16.

В области дефекта в связи с присутствием воды, кислорода, ионов электролитов устанавливается гальваническая ячейка. Образующиеся гидроксильные ионы приводят к высокой щелочности в области и снижению сцепления между подложкой и покрытием. Возникшие в процессе отверждения смолы внутренние напряжения в покрытиях, перепады температур и влажности ускоряют коррозионные процессы. Скорость расслоения в щелочных растворах [252–253] значительно ниже.

Повреждение и последующее отслоение органического покрытия от металлической поверхности происходит различными способами: в виде катодно-

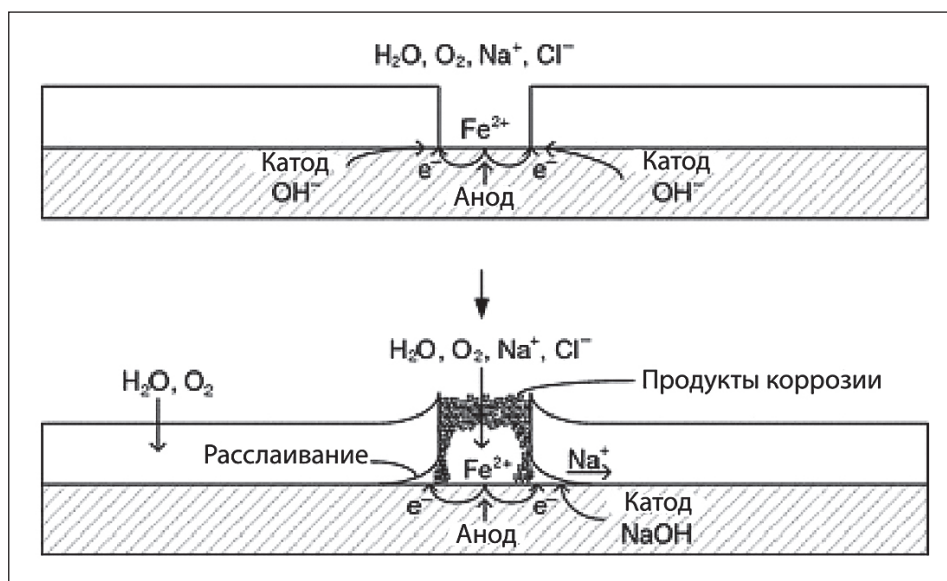


Рис. 16. Расслоение покрытия после повреждения

го расслоения, в виде нитевидной коррозии или при совместном протекании этих процессов. Расслоение органических покрытий на поверхностях, обработанных хроматом или фосфатом, является следствием растворения конверсионного слоя. Доказано, что расслоение эпоксидного покрытия на хромированной стали вызвано разрушением самого конверсионного покрытия. Катодные условия под эпоксидным покрытием восстанавливают $Cr^{6+} \rightarrow Cr^{3+}$. В случае фосфатных конверсионных покрытий протекают аналогичные процессы [254]. Экспериментальные данные подтверждают уменьшение отслаивания покрытия в катодных условиях в присутствии фосфатсодержащих пигментов [255]. Однако характеристики фосфатно-пигментированных покрытий в катодных условиях обеспечивают стойкость связующего к вытеснению щелочи на границе раздела покрытие-сталь. Снижение скорости расслоения в присутствии фосфатсодержащих пигментов обосновано осаждением фосфатного слоя на катодных участках и поляризацией катодной реакции [256]. Среди факторов катодного расслоения покрытий также можно выделить деградацию полимеров в результате окислительных процессов и взаимодействие с активными промежуточными продуктами, такими как H_2O_2 и HO_2 , радикалами OH . Утверждается, что их действие более разрушительно для покрытия, чем образующаяся щелочная среда.

Катодное образование пузырей

Образование вздутий служит первым видимым признаком неполноценной защиты антикоррозионного органического покрытия. Образование

пузырей на бездефектных покрытиях описывается следующими стадиями: набухание, расширение из-за набухания, образование газа и последующие осмотические процессы [257]. Именно водорастворимые загрязнители на поверхности субстрата ответственны за образование осмотических пузырей. Проведены исследования по определению предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ, в исследовательских работах встречаются значительные расхождения пределов допустимого количества водорастворимых загрязняющих веществ на подложке до нанесения покрытий.

Принципиальная модель деградации бездефектных органических покрытий на стали в нейтральном электролите предполагает образование катодного вздутия после переноса ионов по проводящим путям. Предполагается, что водорастворимые катионы диффундируют через покрытие в низкосшитых или низкомолекулярных областях. Деградацию бездефектного покрытия при действии нейтрального электролита можно обобщить следующими стадиями (на рис. 17 номер в кружке соответствует номеру стадии):

1 стадия – проводящие пути развиваются под влиянием воды в гидрофильных областях или областях с низкой плотностью сшивки;

2 стадия – ионы электролита диффундируют по проводящим путям к поверхности подложки;

3 стадия – образование анодных участков на поверхности подложки;

4 стадия – образование катодных участков на периферии путей;

5 стадия – ионы Na^+ диффундируют к катодным участкам для нейтрализации заряда вдоль границы раздела покрытие-подложка;

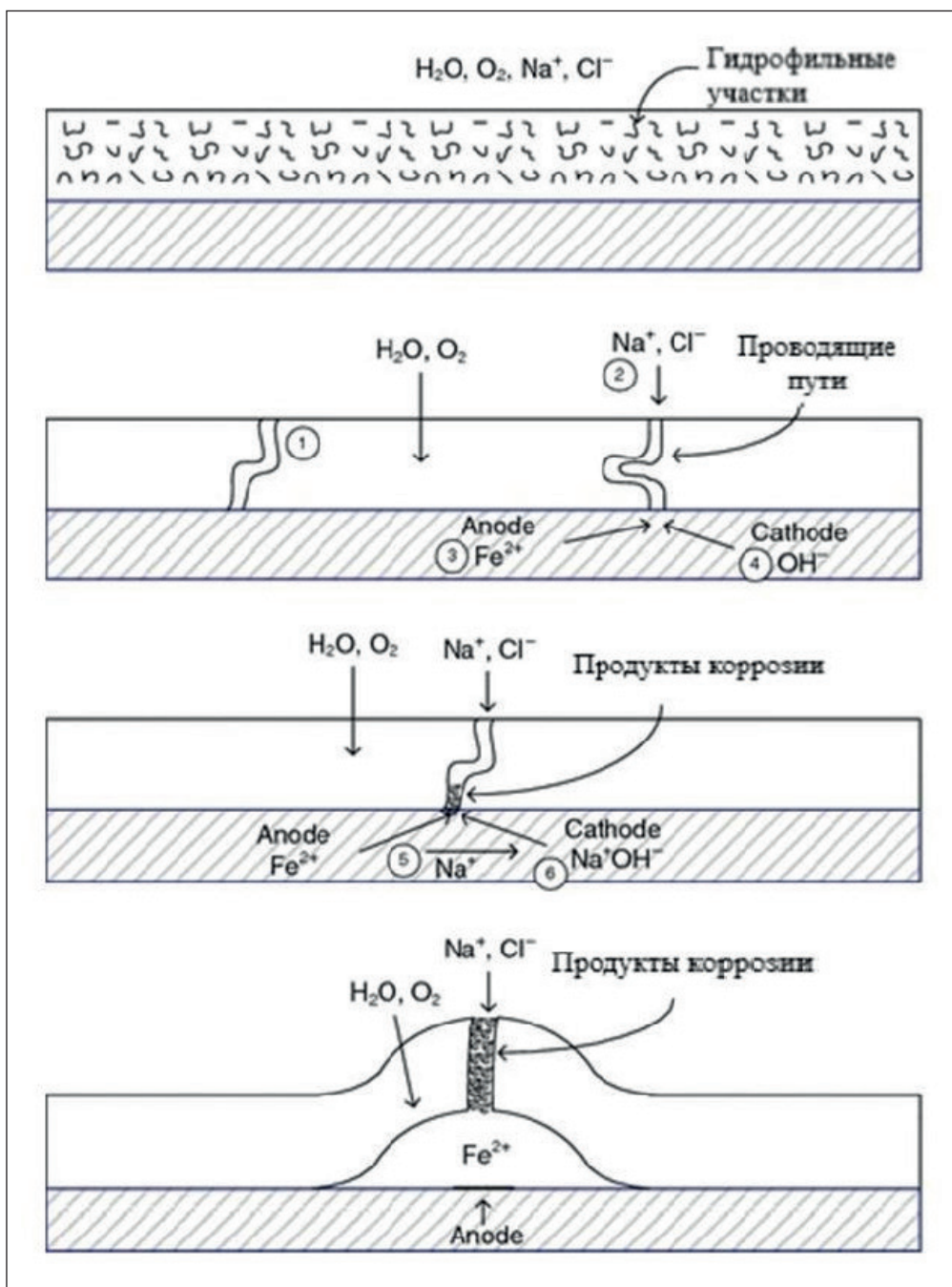


Рис. 17. Механизм деструкции бездефектных органических покрытий на стали в среде нейтрального электролита

6 стадия – щелочность среды способствует катодному расслоению;

7 стадия – вода проходит через покрытие к катодным участкам за счет гигроскопичности материала на катодных участках;

8 стадия – пузыри увеличиваются и сливаются.

Однако в исследованиях не установлен механизм и причины образования катодных пузырей, их взаимосвязь с определенными участками на границе

раздела покрытие-подложка, такими как межфазные микропустоты или дефекты в структуре поверхности подложки. Катодные пузыри могут образоваться рядом с открытым участком и на поврежденных участках покрытия. Поврежденный участок может быть дефектом покрытия (поры и микропустоты) или участком с низкой плотностью сшивки. Жидкость в нейтральных блистерах слабокислая или нейтральная, в то время как жидкость в катодных блистерах сильно щелочная.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Защитные покрытия — одна из самых эффективных, экономичных и простых стратегий предотвращения ущерба. В частности, антикоррозионная защита покрытий основана на барьерных свойствах, самовосстановлении, активном ингибировании коррозии, анодной пассивации и катодной защите. Полимерные покрытия защищают большую часть металла по тоннажу по сравнению с другими антикоррозионными методами. Первоначально покрытия были разработаны исключительно для защиты металлов и сплавов от коррозии, в настоящее время существует потребность в разработке покрытий, обеспечивающих широкий спектр качественных показателей и минимальное негативное воздействие на окружающую среду, что требует комплексного подхода к проектированию и производству покрытий. В совокупности с этим необходимо развитие современных методов определения характеристик покрытий по их морфологии, химическим и физическим свойствам и коррозионному поведению. К тому же подавляющее большинство исследований в разработке покрытий проводилось *ex situ*. В связи с этим для полного исследования свойств и механизмов покрытий в идеале должно быть обеспечено синергетическое использование методов

исследования свойств и механизмов покрытий, а также для получения глубокого механистического понимания в различных масштабах длины — изучение поведения покрытия *in situ*. Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение причинно-следственных связей между свойствами поверхности металла, проникновением влаги и скоростью коррозии для разработки многомасштабной, количественной и имитационной модели оценки антикоррозионных свойств и долговечности органических покрытий.

Нанотехнологии обладают большим потенциалом для создания высокоэффективных антикоррозионных покрытий: повышают адсорбцию/поглощение воды, термомеханические характеристики, адгезию к подложке, устойчивость к ультрафиолетовому излучению и химическую стойкость, износостойкость, электропроводность, плотность сшивания, однородность и биосовместимость. Использование наноматериалов в органических покрытиях значительно улучшает барьерные свойства за счет уменьшения пористости и увеличения извилистого пути для коррозионно-активных веществ. Разработка экологически чистых полимеров, наночастиц и ингибиторов коррозии является перспективным решением для создания более экологичных нанокompозитных органических покрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

225. Kalenda P., Kalendova A., Mosner P., Poledno M. Efficiency of Anticorrosive Pigments Based on Modified Phosphate. *Macromol. Symp.* 2002; 187: 397.
226. ГОСТ 34667.5-2021. Материалы лакокрасочные. Защита стальных конструкций от коррозии при помощи лакокрасочных систем
227. Valet A. Light Stabilizers for Paints. Vincentz Verlag, Hanover. 1997.
228. Funke W. Towards a Unified View of the Mechanisms Responsible for Paint Defects by Metallic Corrosion. *Ind. Eng. Chem. Pro. Res. Dev.* 1985; 24: 343.
229. Ochs H., Vogelsang J., Meyer G. Enhanced Surface Roughness of Organic Coatings due to UV-Degradation: An Unknown Surface of EIS-Artifacts. *Prog. Org. Coat.* 2003; 46: 182.
230. Funke W. Blistering of Paint Films and Filiform Corrosion. *Prog. Org. Coat.* 1981; 9: 29.
231. Nguyen T., Byrd E., Bentz D. Quantifying Water at the Organic Film/Hydroxylated Substrate Interface. *J. Adhes.* 1995; 48: 169.
232. Leidheiser H. Towards a Better Understanding of Corrosion Beneath Organic Coatings. *Corrosion.* 1983; 39: 189.
233. Nguyen T., Byrd E., Bentz D., Lin C. In Situ Measurement of Water at the Organic Coating/Substrate Interface. *Prog. Org. Coat.* 1996; 27: 181.
234. Funke W., Haagen H. Empirical or Scientific Approach to Evaluate the Corrosion Protective Performance of Organic Coatings. *Ind. Eng. Chem. Pro. Res. Dev.* 1978; 17: 50.
235. Linossier I., Gaillard M., Romand M. A Spectroscopic Technique for Studies of Water Transport Along the Interface and Hydrolytic Stability of Polymer/Substrate Systems. *J. Adhes.* 1999; 70: 221.
236. Ruggeri R.T., Beck T.R. An Analysis of Mass-Transfer in Filiform Corrosion. *Corrosion.* 1983; 39: 452.
237. Nguyen T., Hubbard T.B., Pommersheim J.M. Unified model for the Degradation of Organic Coatings on Steel in a Neutral Electrolyte. *J. Coat. Technol.* 1996; 68: 45.

238. Deflorian F., Rossi S. The Role of Ions Diffusion in the Cathodic Delamination Rate of Polyester Coated Phosphatized Steel. *J. Adhes. Sci. Technol.* 2003; 17: 291.
239. Dickie R.A. Chemical Studies of the Organic Coating/Steel Interface After Exposure to Aggressive Environments. *ACS Symposium Series.* 1986; 322: 136.
240. Lyon S.B., Philippe L., Tsouosoglou E. Direct Measurements of Ionic Diffusion in Protective Organic Coatings. *Transactions of the Institute of Metal Finishing.* 2006; 23.
241. Koehler E.L. The Mechanism of Cathodic Disbondment of Protective Organic Coatings – Aqueous Displacement at Elevated pH. *Corrosion.* 1984; 5.
242. Parks J., Leidheiser H. Ionic Migration through Organic Coatings and Its Consequences to Corrosion. *Ind. Eng. Chem. Pro. Res. Dev.* 1986; 25: 1.
243. Watts J.F., Castle J.E. The Application of Photoelectron Spectroscopy to the Study of Polymer-to-Metal Adhesion. Part 2. *J. Mater. Sci.* 1984; 2259.
244. Leidheiser H., Granata R.D. Ion Transport through Protective Polymeric Coatings Exposed to an Aqueous Phase. *J. Res. Dev.* 1988; 582.
245. Grundmeier G., Stratmann M. Adhesion and De-Adhesion Mechanisms at Polymer/Metal Interfaces: Mechanistic Understanding Based on In-Situ Studies of Buried Interfaces. *Annu. Rev. Mater. Sci.* 2005; 35: 571.
246. Ritter J.J. Ellipsometric Studies on the Cathodic Delamination of Organic Coatings on Steel and Iron. *J. Coat. Technol.* 1982; 54: 51.
247. Watts J.F., Castle J.E. The Application of Photoelectron Spectroscopy to the Study of Polymer-to-Metal Adhesion. Part 1. *J. Mater. Sci.* 1983; 18: 2987.
248. Murase M., Watts J.F. XPS Study of Coating Delamination from Non-Rinse Chromate Treated Steel. *J. Mater. Sci.* 1998; 8: 1007.
249. Watts J.F. Mechanistic Aspects of the Cathodic Delamination of Organic Coatings. *J. Adhes.* 1989; 73.
250. Hamade R.F., Dillard D.A. Cathodic Weakening of Elastomer-to-Metal Adhesive Bonds: Accelerated Testing and Modeling. *J. Adhes. Sci. Technol.* 2003; 17: 1235.
251. Pommersheim J.M., Nguyen T., Zhang Z., Hubbard J.B. Degradation of Organic Coatings on Steel: Mathematical Models and Predictions. *Prog. Org. Coat.* 1994; 25: 23.
252. Darwin A.B., Scantlebury J.D. The Behaviour of Epoxy Powder Coatings on Mild Steel under Alkali Conditions. *J. Corros. Sci. Eng.* 1999; 2.
253. Smith A.G., Dickie R.A. Adhesion Failure Mechanisms of Primers. *Ind. Eng. Chem. Pro. Res. Dev.* 1978; 17: 42.
254. Sommer A.J., Leidheiser H. Effect of Alkali Metal Hydroxides on the Dissolution of Zinc Phosphate Conversion Coating on Steel and Pertinence to Cathodic Delamination. *Corrosion.* 1987; 43: 661.
255. Hernandez M.A., Galliano F., Landolt D. Mechanism of Cathodic Delamination Control of Zinc Aluminum. *Corros. Sci.* 2004; 46: 2281.
256. Furbeth W., Stratmann M. Investigation of the Delamination of Polymer Films from Galvanized Steel with the Scanning Kelvin Probe. *Fresenius J. Anal. Chem.* 1995; 353: 337.
257. de la Fuente D., Bohm M., Houyoux C., Rohwerder M., Morcillo M. The Settling of Critical Levels of Soluble Salts for Painting. *Prog. Org. Coat.* 2007; 58: 23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вихарева Ирина Николаевна – кандидат химических наук, заместитель директора НОЦ «Нанотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, vikharevain@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5681-2767>

Антипин Вячеслав Евгеньевич – кандидат технических наук, заместитель директора НОЦ «Нанотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, antipinve@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4337-1760>

ВКЛАД АВТОРОВ

Вихарева И.Н. – концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста

Антипин В.Е. – итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Статья поступила в редакцию 11.01.2024; одобрена после рецензирования 02.02.2024; принята к публикации 06.02.2024.