



# НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-620.197

## НАНОПОКРЫТИЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ КОРРОЗИИ

**Волков Дмитрий Игоревич**

Студент, Кафедра физической химии и коррозии, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева РХТУ г. Москва, Россия

**Семенова Лидия Павловна**

Студент, Кафедра физической химии и коррозии, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева РХТУ г. Москва, Россия

### Аннотация

Коррозия металлических конструкций ежегодно наносит колоссальный экономический ущерб, требуя постоянного поиска более эффективных и долговечных методов защиты. Нанопокрытия представляют собой передовое решение в области анткоррозионной защиты. Благодаря своей ультратонкой толщине и уникальной структуре, сформированной наnanoуровне, они обеспечивают исключительную барьерную защиту и обладают свойствами самовосстановления. Данная работа анализирует ключевые механизмы коррозионной защиты, реализуемые нанопокрытиями, включая пассивный барьер, активное ингибирирование и катодную защиту. Особое внимание уделяется методам получения таких покрытий, в частности, золь-гель синтезу, а также использованию наночастиц и углеродных нанотрубок для создания многофункциональных композитных слоев. Рассматриваются перспективы разработки интеллектуальных самовосстанавливающихся систем, способных реагировать на повреждения.

**Ключевые слова:** нанопокрытие, коррозия, анткоррозионная защита, барьерный эффект, золь-гель метод, самовосстановление, нанокомпозиты, ингибиторы.

### Введение

Коррозия, являющаяся электрохимическим процессом разрушения металлов под воздействием окружающей среды, остается одной из наиболее серьезных проблем в инженерии и материаловедении. Экономический ущерб от коррозии в мировом масштабе исчисляется триллионами долларов, включая затраты на замену вышедшего из строя оборудования, ремонт инфраструктуры и предотвращающие мероприятия.

Традиционные методы защиты, такие как толстые слои органических красок или гальванические покрытия, часто обладают недостаточной долговечностью, особенно в агрессивных средах и при механических повреждениях.

Развитие нанотехнологий открыло новую эру в антакоррозионной защите, предложив концепцию нанопокрытий. Нанопокрытие — это ультратонкий защитный слой, толщина которого измеряется нанометрами. Благодаря уникальным особенностям, связанным с размером и высокой плотностью упаковки наноструктурных элементов, эти покрытия демонстрируют значительно более высокую плотность, меньшую пористость и, как следствие, превосходные барьерные свойства по сравнению с микроразмерными аналогами. Основная цель исследований в этой области — создание многофункциональных нанопокрытий, которые не только предотвращают проникновение агрессивных агентов, но и активно реагируют на начальную стадию коррозии.

## **Механизмы Защиты Нанопокрытиями**

Эффективность нанопокрытий обусловлена сочетанием нескольких защитных механизмов, действующих на границе раздела фаз металл-покрытие-среда.

**Барьерная защита.** Главным механизмом является пассивная барьерная защита. Нанопокрытия, обладая чрезвычайно плотной и гомогенной структурой, эффективно блокируют диффузию агрессивных агентов, таких как ионы хлора, кислород и молекулы воды, к поверхности металла. Из-за минимального размера составляющих наночастиц или нанослоев, путь проникновения коррозионных агентов через покрытие максимально удлиняется, а количество сквозных пор сводится к минимуму. Это значительно замедляет начало электрохимической реакции на поверхности металла.

**Активное ингибирирование.** Вторым важным механизмом является активное ингибирирование. В состав нанопокрытий могут быть введены капсулированные или иммобилизованные наноконтейнеры с ингибиторами коррозии. При возникновении локального повреждения или изменении кислотности среды микрокапсулы разрушаются, высвобождая ингибитор, который блокирует активные центры коррозии на поверхности металла. Этот локальный и своевременный выпуск ингибитора обеспечивает целенаправленную защиту поврежденной области, не загрязняя при этом окружающую среду.

**Катодная и анодная защита.** Некоторые нанопокрытия, особенно те, что содержат наночастицы цинка, алюминия или других менее благородных металлов, могут обеспечивать катодную защиту. В случае повреждения покрытия и контакта с электролитом, частицы выступают в качестве жертвенного анода, растворяясь первыми и защищая основной металл. Нанопокрытия также могут выступать в качестве анодных пассиваторов, способствуя формированию стабильной пассивной оксидной пленки на поверхности металла-субстрата.

## **Методы Синтеза Нанопокрытий**

Разработка эффективного нанопокрытия тесно связана с выбором технологии его получения, которая должна обеспечивать высокую адгезию, однородность и контролируемую толщину.

**Золь-гель синтез.** Золь-гель синтез является одним из наиболее универсальных и распространенных методов. Он основан на гидролизе и последующей поликонденсации прекурсоров в растворе с образованием коллоидного раствора, или золя, который затем превращается в гель. Золь-гель растворы легко наносятся на поверхность методом окунания или распыления, а последующая термообработка приводит к образованию аморфного или нанокристаллического оксидного покрытия. Преимущество метода заключается в возможности введения функциональных наночастиц или ингибиторов непосредственно в золь перед нанесением, что позволяет создавать композитные материалы.

**Электрохимическое осаждение.** Электрохимическое осаждение позволяет получать нанокомпозитные покрытия путем соосаждения наночастиц, например, оксида алюминия или карбида кремния, с металлической матрицей. Контролируя плотность тока и состав электролита, можно точно управлять размером зерна и процентным содержанием нанофазы, что критически важно для механической прочности и износостойкости.

**Химическое и физическое осаждение из паровой фазы.** Методы химического осаждения из паровой фазы и физического осаждения из паровой фазы используются для создания ультратонких, плотных и высокоадгезивных керамических нанослоев, таких как нитрид титана или алмазоподобный углерод. Эти методы обеспечивают максимальную чистоту покрытия и его прочное сцепление с субстратом.

## **Нанокомпозитные и Самовосстановливающиеся Покрытия**

Современный тренд в разработке нанопокрытий направлен на создание многофункциональных систем, способных не только пассивно защищать, но и активно восстанавливать повреждения.

**Нанокомпозиты с углеродными структурами.** Включение углеродных нанотрубок или графеновых нанопластинок в полимерную или керамическую матрицу покрытия приводит к значительному улучшению его механических свойств, таких как твердость и устойчивость к царапинам, а также повышает его барьерную эффективность за счет создания лабиринтного пути для коррозионных агентов. Добавление этих нанонаполнителей в несколько слоев позволяет создавать покрытие с градиентными свойствами.

**Интеллектуальные самовосстанавливающиеся системы.** Это наиболее передовое направление. Самовосстанавливающиеся покрытия содержат микрокапсулы, заполненные заживляющим агентом обычно низковязкой полимерной смолой, и

катализатором. Когда нанопокрытие повреждается, например, царапиной, капсулы разрываются. Заживляющий агент вытекает в зону повреждения, смешивается с катализатором и быстро полимеризуется, полностью закрывая дефект. Таким образом, предотвращается доступ агрессивной среды к металлу. Эффективность системы зависит от размера, прочности оболочки капсул и скорости реакции заживления.

## **Вызовы и Перспективы Применения**

Несмотря на очевидные преимущества, широкое внедрение нанопокрытий сталкивается с рядом технологических и экономических вызовов.

**Вопросы масштабирования и стоимости.** Высокая стоимость прекурсоров, а также сложность и низкая производительность некоторых прецизионных методов синтеза, таких как осаждение из паровой фазы или высококонтролируемый золь-гель синтез, ограничивают их широкое промышленное применение. Необходимо разрабатывать более экономичные и высокоскоростные методы массового производства.

**Долговечность и стандартизация.** Обеспечение долгосрочной стабильности и прогнозируемой долговечности нанопокрытий в реальных эксплуатационных условиях, особенно при воздействии ультрафиолетового излучения, высоких температур и механического износа, требует дальнейших исследований и разработки унифицированных стандартов тестирования.

**Перспективы.** Наибольшие перспективы открываются в области автомобильной, авиационной и морской промышленности, где сочетание низкого веса и высокой коррозионной стойкости дает значительный экономический эффект. Активное развитие интеллектуальных покрытий с многократным циклом самовосстановления обещает создание принципиально новых, не требующих обслуживания, материалов.

## **Заключение**

Нанопокрытия представляют собой эволюционный скачок в технологиях антикоррозионной защиты. Их способность формировать ультраплотный барьер, а в более сложных системах — активно ингибиовать и восстанавливать повреждения, делает их незаменимыми для защиты критически важных и высоконагруженных конструкций. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию состава нанокомпозитных матриц, повышение эффективности систем самовосстановления и, самое главное, на снижение стоимости производства для обеспечения их широкой промышленной доступности.

## Литература

1. Волков Д. И. Наноструктурные материалы в защите от коррозии. – М.: Техносфера, 2024. – 480 с.
2. Семенова Л. П. Золь-гель покрытия с инкапсулированными ингибиторами для защиты алюминиевых сплавов. // Коррозия: материалы и защита. – 2025. – Т. 15, № 2. – С. 25–38.
3. Карякин А. В. Теория и практика антакоррозионной защиты. – СПб: Политехника, 2018. – 550 с.
4. Шаталов А. Я., Маршаков И. А. Теория коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1991. – 720 с.
5. Ata M. S., Al-Otaibi F. Z., Al-Ghamdi A. A. Development of corrosion-resistant coatings: a review. // J. Mater. Sci. – 2018. – Vol. 53, № 8. – P. 5557–5584.