

УДК 620.197.3

Защита меди и гальванических медных покрытий камерным ингибитором на основе октадециламина и бензотриазола

А.А. Шишкин,^{1,2} А.Ю. Лучкин,¹ О.А. Гончарова,¹ О.В. Трипачев,¹
А.В. Кузов,¹ Н.Н. Андреев¹ и Т.А. Ваграмян²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН), 119071, г. Москва, Ленинский проспект. 31, корп. 4.

² Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, (РХТУ им. Д.И. Менделеева), 125047 Москва, Миусская площадь, д. 9

Аннотация

Изучено влияние горячих паров смеси октадециламина и бензотриазола на коррозионную стойкость монолитной меди и гальванического медного покрытия. Установлено, что ингибитор эффективно тормозит инициирование коррозии обоих материалов в солевом тумане. Оптимальные условия камерной обработки меди: 20 минут при температуре 150°C. Такой режим позволяет сформировать устойчивую защитную пленку без нарушения декоративных свойств поверхности. Показано, что смесевой ингибитор формирует на поверхности меди пленки, сокращающие площадь активной поверхности металла и стабилизирующие его пассивное состояние.

Ключевые слова: медь, коррозионная стойкость, камерная обработка, октадециламин, бензотриазол, вольтамперометрия, спектроскопия электрохимического импеданса.

Поступила в редакцию 25.11.2025 г.; После доработки 25.11.2025 г.; Принята к публикации 25.11.2025 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2025-3-4-111-123](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2025-3-4-111-123)

Введение

Медь как основной конструкционный материал или в виде покрытий широко используется в технике [1–5]. Однако низкая стойкость этого металла в атмосферных условиях требует специальных мер по его защите [6].

Часто для борьбы с атмосферной коррозией меди используют ингибиторы – контактные, либо парофазные: летучие или камерные (КИН). Напомним, что защита металлов КИН состоит в их кратковременной обработке изделий парами малолетучих в обычных условиях ингибиторов в замкнутом объеме (камере) при повышенной температуре [7–11]. Рациональный выбор активного вещества и условий его применения при камерной обработке (КО) обеспечивает сохранность металлов на протяжении длительного времени за счет защитного последствия

(ЗП) адсорбционных пленок ингибитора. Преимущества КИН относительно других классов ингибиторов описаны в [9, 12].

В ИФХЭ РАН разработан универсальный КИН, обеспечивающий защиту черных и цветных металлов (ИФХАН-125) [12–16]. В качестве активного вещества в нем выступает смесь октадециламина и бензотриазола. Цель настоящей работы – оценка эффективности ИФХАН-125 при защите монолитной и гальванической меди.

Материалы и методика

Подготовка образцов

В работе также использовали образцы меди М1 размером 40×20×4 мм. Перед КО их шлифовали, абразивными кругами зернистостью Р60 – Р1500, обезжиривали венской известью, промывали дистиллированной водой и высушивали.

Гальваническую медь толщиной 15–18 мкм (М15) наносили на поверхность плоских образцов Ст3 тех же размеров в соответствии с рекомендациями [17, 18]. Сталь шлифовали, обезжиривали в растворе Лабомида 203¹ (30 г/л, 10 мин, 70°C) и, затем, травили в растворе HCl (250 г/л, 2 мин, 20°C). Травильный шлам снимали в растворе хромпика² (125 г/л, 3 мин, 20°C). Далее металл декапировали в соляной кислоте (100 г/л, 20 сек, 20°C). Перед меднением на сталь наносили подслои никеля толщиной до 1 мкм из кислого электролита никелирования³ (3 А/дм², 20 сек, 20°C, без перемешивания, никелевые аноды). Медное покрытие наносили из электролита блестящего серноокислого меднения⁴ (2 А/дм², 20 сек, 20°C, перемешивание, медные аноды).

КО проводили в стеклянной герметично закрываемой ячейке – камере объемом 0,6 л в сушильном шкафу SNOI-50/350. В камеру в одном стеклянном бюксе вносили по 0,05 г октадециламина и бензотриазола. Температуру обработки ($t_{обр}$) варьировали в диапазоне 60–160°C, время ($\tau_{обр}$) – от 5 до 300 минут. После КО и до помещения в коррозионную среду образцы выдерживали на воздухе 24 часа.

Коррозионные испытания в нейтральном соляном тумане

Коррозионную стойкость М1 и М15 при различных вариантах их подготовки оценивали в нейтральном соляном тумане в камере Wiess SC 450 при комнатной температуре. В испытаниях определяли количество циклов до появления на образцах коррозионных поражений ($\tau_{кор}$). Каждый цикл включал 15-ти минутное распыление 5%-го раствора NaCl и 45-ти минутную экспозицию образцов в образовавшемся при распылении солевом тумане. Осмотр образцов проводили

1 Состав в весовых процентах: Na₂CO₃ – 50%, Na₅P₃O₁₀ – 30%, Na₂SiO₃ – 10%, синтанол ДС-10 – 8%, алкилсульфонаты – 2%.

2 Состав: CrO₃ – 100 г/л, H₂SO₄ – 20 г/л, NaCl – 4 г/л

3 Состав: NiCl₂·6H₂O – 250 г/л, HCl – 90 г/л.

4 Состав: CuSO₄·5H₂O – 220 г/л, H₂SO₄ – 60 г/л, HCl – 0,265 мл/л (ρ = 1,16 г/мл), Cupramax AC 9282 – 5 мл/л, Cupramax AC 9283 – 0,5 мл/л, Cupramax AC 9284 – 0,5 мл/л.

через 55 минут после начала каждого цикла.

Вольтамперометрические исследования

Для проведения потенциодинамических опытов использовали потенциостат IPC-Pro и прижимную трехэлектродную ячейку. Вспомогательным электродом служил графит. Потенциалы (E) измеряли относительно насыщенного хлоридсеребряного электрода и пересчитывали в нормальную водородную шкалу. Опыты проводили в боратном буферном растворе с pH 7,36 и содержанием 0,001 М хлорида натрия. Раствор заливали в ячейку, выдерживали в нем электроды 5 мин и поляризовали их от установившегося E ($E_{\text{нач}}$) в анодную сторону до E , превышающего потенциал локальной депассивации металла ($E_{\text{по}}$) на 0,05–0,10 В. Скорость развертки E составляла 0,2 мВ/с. О локальной депассивации металла судили по резкому возрастанию или осцилляциям плотности анодного тока (i). В некоторых случаях опыт прерывали сразу после появления осцилляций на поляризационных кривых, чтобы результатами осмотра подтвердить питтингообразование. В качестве критериев защитного действия использовали: i в области активного растворения металла ($i_{\text{акт}}$), значения $E_{\text{по}}$ и, при отсутствии активного растворения, величины противопиттингового базиса ($\Delta E = E_{\text{по}} - E_{\text{нач}}$).

Спектроскопия электрохимического импеданса (СЭИ)

Для получения спектров ЭИ использовали потенциостат IPC-Pro и анализатор частотного отклика FRA (ИФХЭ РАН, РФ). Эксперименты проводили в ячейке, аналогичной описанной в разделе выше. В опытах использовали те же электролиты, а также электроды (сравнения и вспомогательный). Диапазон изменения частот составлял 0,1 ÷ 100000 Гц.

Спектры ЭИ описывали модифицированной эквивалентной схемой Мансфелда, приведенной на Рисунке 1.

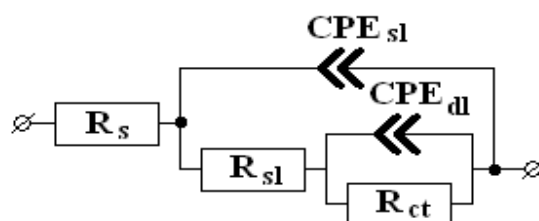


Рисунок 1. Модифицированная эквивалентная схема Мансфелда

Здесь R_s — сопротивление объемного электролита между вспомогательным и рабочим электродами, которое не влияет на электродные процессы и зависит от проводимости среды и геометрии ячейки; R_{sl} — сопротивление оксидно-гидроксидного и адсорбционного поверхностных слоев; R_{ct} — сопротивление переноса заряда фарадеевской реакции, определяющей кинетику коррозионного процесса; CPE_{sl} — элемент постоянной фазы, характеризующий емкость

поверхностных слоев, CPE_{dl} – элемент постоянной фазы, отражающий псевдоемкость фарадеевской реакции.

Обработку результатов и расчёт параметров эквивалентной схемы проводили при помощи программы Dummy Circuits Solver version 2.1.

Эффективность защитного действия КИН оценивали в соответствии с рекомендациями [20]. Коэффициент торможения коррозии по блокировочному механизму ($\gamma_{бл}$), а также интегральный коэффициент торможения коррозии по активационному механизму ($\gamma_{акт}$) в расчёте на геометрическую поверхность образца определяли по формулам:

$$\gamma_{бл} = \frac{R_{sl}^{об}}{R_{sl}^{ис}} \quad (1)$$

$$\gamma_{акт} = \frac{R_{ct}^{об}}{R_{ct}^{ис}} \quad (2)$$

где индекс «об» относится к электродам после термо- и камерной обработки, а индекс «ис» – к электродам в исходном состоянии (ИС).

Истинный коэффициент торможения коррозии по активационному механизму ($\gamma_{акт}^*$), учитывающий изменение доли активной поверхности за счёт адсорбции ингибитора, степень заполнения поверхности блокирующими коррозией слоями (Θ) и степень защиты металла (Z^*) рассчитывали по формулам:

$$\gamma_{акт}^* = \frac{\gamma_{акт}}{\gamma_{бл}} \quad (3)$$

$$\Theta = 1 - \frac{1}{\gamma_{бл}} \quad (4)$$

$$Z^* = 1 - \frac{1}{\gamma_{акт}} \quad (5)$$

Результаты и их обсуждение

Коррозионные испытания в нейтральном соляном тумане

Образцы М1 и М15 в ИС, т.е. не подвергавшиеся ни ТО, ни КО, в условиях солевого тумана демонстрировали низкую коррозионную стойкость. Первые коррозионные поражения (черные точки для М1 и локальные очаги с продуктами коррозии рыжего цвета, характерного для стали подложки, в случае М15) появлялись на металле уже в процессе первого цикла испытаний в солевом тумане.

ТО образцов без КИН в течении 1 часа при температурах 60–120°C на коррозионной стойкости М1 и М15 не сказывалась. Значения $\tau_{кор}$ при этом не превышало одного цикла (Таблица 1). Более высокие $t_{обр}$ (120–160°C) вели к росту

$\tau_{\text{кор}}$ обоих материалов. Однако уже при 100°C сама ТО вызывала покраснение поверхности образцов из-за роста пленки оксидов меди. В таблицах 1 и 2 покраснение меди в процессе обработки отмечено индексом *.

Таблица 1. Результаты коррозионных испытаний образцов М1 и М15 после обработки при различных $t_{\text{обр}}$. $\tau_{\text{обр}} = 1$ час.

Условия обработки	$\tau_{\text{кор}}$ (циклы) при различных $t_{\text{обр}}$ (°C)						
	60	80	100	120	140	150	160
М1							
ТО без КИН	1	1	1	1*	4*	4*	6*
ИФХАН-125	2	12	42	35*	100*	120*	120*
М15							
ТО без КИН	1	1	1	1*	4*	4*	6*
ИФХАН-125	1	4	8	24*	80*	96*	96*

КО образцов М1 парами ИФХАН-125 повышала ЗП адсорбционных пленок. Зависимость $\tau_{\text{кор}}-t_{\text{обр}}$ для монолитной меди имела локальный максимум при 100°C (42 цикла). Дальнейший рост $t_{\text{обр}}$ сопровождался сначала снижением $\tau_{\text{кор}}$ (35 циклов при 120°C), а затем значительным (до 120 циклов при 150°C) возрастанием эффективности защиты. В интервале $t_{\text{обр}}$ 150–160°C значения $\tau_{\text{кор}}$ не менялись. Для $t_{\text{обр}}$ выше 120°C в процессе КО наблюдалось покраснение меди.

При КО образцов М15 в диапазоне $t_{\text{обр}}$ от 60 до 150°C наблюдалось монотонное повышение коррозионной стойкости образцов от 1 до 96 циклов испытаний. Далее значения $\tau_{\text{кор}}$ стабилизировались. Отметим, что пары ИФХАН-125 не влияли на термическое окисление меди и покраснение покрытия.

В целом КО образцов ИФХАН-125 обеспечивала лучшую защиту для монолитной меди М1 по сравнению с гальванической медью М15.

Приведенные выше $\tau_{\text{кор}}-t_{\text{обр}}$ зависимости характеризовались особенностями, ранее при исследованиях КИН не наблюдавшимися. Для других систем металл – КИН такие зависимости имели выраженный максимум, т.е. оптимальное значение $t_{\text{обр}}$. Превышение его всегда сопровождалось снижением эффективности защиты. Природа такого максимума в соответствии с [15] связана с двумя факторами, противоположно влияющими на защиту. С одной стороны, с ростом $t_{\text{обр}}$ повышается давление паров КИН в камере, что благоприятствует его адсорбции. С другой – с ростом температуры снижается способность металла адсорбировать пары.

Для образцов М1 такой максимум достаточно выражен при 100°C. Однако рост $t_{\text{обр}}$ выше 120°C сопровождался значительным повышением защиты. Возможно, это связано с реакцией октадециламина и бензотриазола в бьюксе, помещенном в камеру, и образованием нового соединения, которое защищает металл эффективнее, чем смесь паров октадециламина и бензотриазола.

Для образцов М15 максимум на $\tau_{\text{кор}}-t_{\text{обр}}$ зависимостях вообще не фиксировался. Авторы пока не могут однозначно объяснить это, однако полагают, что причина также может быть связана с образованием нового соединения и связанным с ним резким ростом ЗП. Такой рост может «маскировать» экстремум

на анализируемых зависимостях.

Резюмируя приведенный выше материал, отметим, что с точки зрения практики оптимальной $t_{обр}$ монолитной и гальванической меди является 150°C . Это минимальная $t_{обр}$, при которой достигается максимальное ЗП адсорбционных пленок.

Помимо оптимальных $t_{обр}$ каждая система металл – КИН характеризуется оптимальной продолжительностью КО. Она была определена на следующем этапе работы. Данные об эффективности КО образцов М1 и М15, полученные при $t_{обр} = 150^{\circ}\text{C}$ и различных $\tau_{обр}$ приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Результаты коррозионных испытаний образцов М1 и М15 после обработки различной продолжительности. $t_{обр} = 150^{\circ}\text{C}$

Условия обработки	$\tau_{кор}$ (циклы) при различных $\tau_{обр}$ (мин.)						
	5	20	30	60	120	180	300
М1							
ТО без КИН	1	1	1	4*	5*	5*	5*
ИФХАН-125	24	120	120	120*	120*	120*	120*
М15							
ТО без КИН	1	1	1	4*	5*	5*	5*
ИФХАН-125	24	96	96	96*	96*	96*	96*

С ростом $\tau_{обр}$ от 0 до 20 мин коррозионная стойкость меди возрастала. При более длительной КО значения $\tau_{кор}$ стабилизировались на уровне 120 циклов для М1 и 96 циклов для М15. Надо полагать, что при этом на металлах формировались равновесные адсорбционные пленки ингибитора. Покраснение образцов обоих типов наблюдали при КО продолжительностью более 30 минут. То есть $\tau_{обр} = 20$ минутам с одной стороны обеспечивает максимальную защиту меди, с другой – не влияет на декоративные свойства поверхности.

Таким образом, гальваническая медь М15 обладает меньшей по сравнению с монолитной медью М1 коррозионной стойкостью. КО в парах ИФХАН-125 значительно повышает коррозионную стойкость металлов в солевом тумане. С точки зрения практического применения ИФХАН-125 для защиты меди оптимальными условиями КО являются температура 150°C и продолжительность 20 минут.

Исследования механизмов защитного действия ИФХАН-125 методами вольтамперометрии и спектроскопии ЭИ проводили для меди, обработанной в оптимальных условиях.

Вольтамперометрические исследования

Анодные поляризационные кривые меди М1 и медного покрытия М15 представлены на Рисунке 2, а их основные характеристики в Таблице 3.

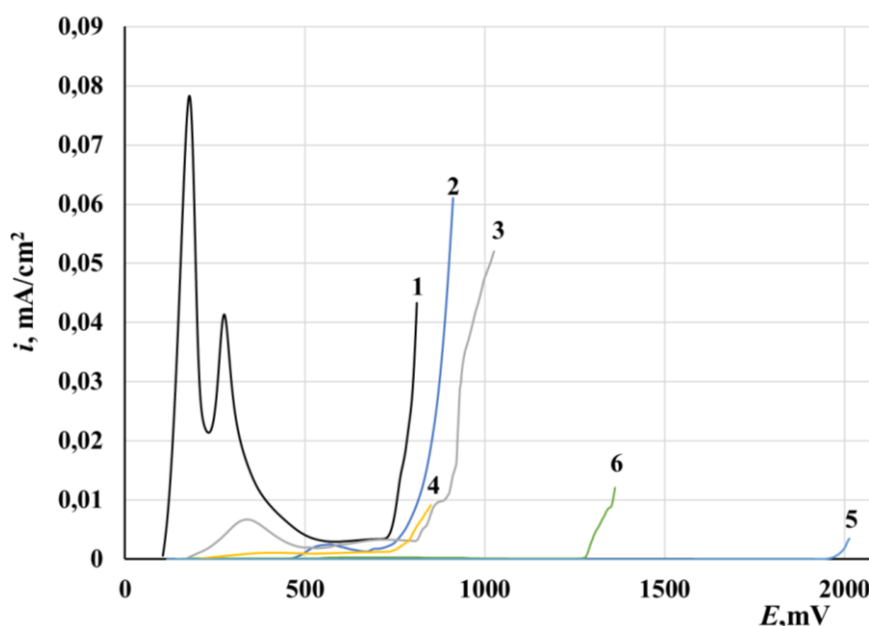


Рисунок 2. Анодные поляризационные кривые меди М1 (1, 3, 5) и М15 (2, 4, 6) в ИС (1, 2), после ТО без КИН (3, 4) и после КО (5, 6). $\tau_{\text{обр}} = 20$ мин, $t_{\text{обр}} = 150^\circ\text{C}$.

$E_{\text{нач}}$ меди М1 в ИС локализован около 105 мВ. В области 100–300 мВ наблюдаются два пика активного растворения. При дальнейшей анодной поляризации происходила пассивация электродов. Характерные для пассивного состояния i не превышали 3 мкА/см². При $E = 730$ мВ пассивность нарушалась: величины i резко возрастали. При визуальном осмотре на поверхности металла, извлеченного из электролита, можно было видеть черные точки – питтинги.

Таблица 3. Характеристики анодных поляризационных кривых меди М1 и М15. $\tau_{\text{обр}} = 20$ мин, $t_{\text{обр}} = 150^\circ\text{C}$.

Условия обработки	$E_{\text{нач}}$, мВ	i , мкА/см ²	$E_{\text{по}}$, мВ	ΔE , мВ
М1				
ИС	105	75	730	–
ТО без КИН	175	5	795	–
ИФХАН-125	115	–	1985	1870
М15				
ИС	415	–	724	309
ТО без КИН	195	–	735	540
ИФХАН-125	140	–	1290	1150

Для гальванической меди М15 в ИС активное растворение было подавлено. $E_{\text{нач}}$ составлял 105 мВ. Поляризационные кривые имели характерный для пассивного металла вид. Можно предположить, что пассивное состояние в этом случае связано с использованием в электролите меднения добавок Suprathax AC, адсорбирующихся на металле. Пробой пассивной пленки происходил при $E_{\text{по}} = 724$ мВ. При этом ΔE составляла 309 мВ.

ТО М1 при 150°C в течение 20 мин приводила к облагораживанию $E_{\text{нач}}$ по сравнению с ИС на приблизительно 70 мВ и существенному подавлению активного растворения. Значения i в области характерных для него E не

превышали 7 мкА/см^2 . Смещение E в анодную область приводило к пассивации электрода, а затем к питтингообразованию. Отметим, что ТО несколько затрудняла этот процесс. Значения $E_{\text{по}} = 795 \text{ мВ}$, т.е. были смещены в анодную сторону относительно ИС меди.

ТО гальванической меди при тех же $t_{\text{обр}}$ и $\tau_{\text{обр}}$ мало влияла на $E_{\text{нач}}$. Он слегка облагораживался по сравнению с ИС М15, однако величины эффекта были близки разбросу данных в параллельных опытах. Значения $E_{\text{по}}$ и ΔE за счет ТО составляли 735 и 540 мВ, соответственно.

КО обоих типов электродов ИФХАН-125 ощутимо сказывалась на их анодном поведении и, в первую очередь, на $E_{\text{по}}$. Для М1 величины $E_{\text{по}}$ приближалась к 2000, а для М15 к 1300 мВ. Активное растворение металлов отсутствовало. Протяженность пассивных областей на поляризационных кривых составляла для 1870 мВ для монолитной и 1150 мВ для гальванической меди.

Резюмируя результаты поляризационных опытов, отметим, гальваническая медь М15 более склонна к питтинговому растворению, чем монолитная медь М1. КО ИФХАН-125 повышает коррозионную стойкость меди за счет стабилизации ее пассивного состояния. При этом защитные эффекты более выражены для монолитной меди.

Более подробную информацию о механизме действия ИФХАН-125, степенях защиты можно получить, анализируя спектры ЭИ.

Спектроскопия ЭИ

Диаграммы Найквиста электродов М1 и М15 в ИС, после ТО и КО представлены на Рисунке 3. Все годографы представляли собой деформированные полуокружности и адекватно описывались эквивалентной схемой, приведенной на Рисунке 1. Ее номиналы для различных вариантов подготовки поверхности электродов приведены в Таблице 4.

Первичный анализ диаграмм показывает, что радиус годографов менялся в зависимости от коррозионной стойкости электродов в солевом тумане. При однотипной подготовке образцов электроды М1 имели больший радиус по сравнению с М15. ТО и, в большей мере, КО существенно увеличивает радиусы.

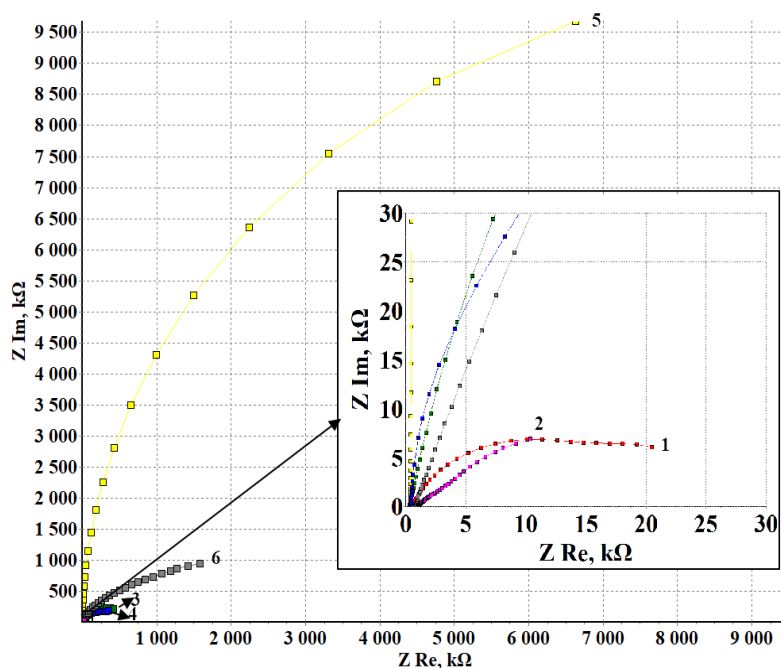


Рисунок 3. Диаграммы Найквиста меди М1 (1, 3, 5) и М15 (2, 4, 6) в ИС (1, 2), после ТО без КИН (3, 4) и после КО (5, 6). $\tau_{\text{обр}} = 20$ мин, $t_{\text{обр}} = 150^\circ\text{C}$.

Таблица 4. Параметры эквивалентной схемы при различных условиях обработки меди М1 и М15. $\tau_{\text{обр}} = 20$ мин, $t_{\text{обр}} = 150^\circ\text{C}$.

Условия обработки	R_s $\text{K}\Omega \cdot \text{cm}^2$	CPE_{sl} Ss^n/cm^2	n_{sl}	R_{sl} $\text{K}\Omega \cdot \text{cm}^2$	CPE_{dl} Ss^n/cm^2	n_{dl}	R_{ct} $\text{K}\Omega \cdot \text{cm}^2$
М1							
ИС	0,5	$7,72 \cdot 10^{-06}$	0,87	2,6	$5,78 \cdot 10^{-05}$	0,84	3,1
ТО без КИН	0,3	$9,84 \cdot 10^{-07}$	0,9	392,6	$4,49 \cdot 10^{-06}$	1	212,2
ИФХАН-125	0,4	$1,09 \cdot 10^{-07}$	1	17831	$1,37 \cdot 10^{-07}$	1	3114,8
М15							
ИС	0,5	$6,93 \cdot 10^{-05}$	0,65	11,6	$3,46 \cdot 10^{-05}$	1	18,8
ТО без КИН	0,4	$9,82 \cdot 10^{-07}$	0,87	399,1	$1,07 \cdot 10^{-05}$	1	309,6
ИФХАН-125	0,4	$1,83 \cdot 10^{-07}$	0,82	896,6	$6,51 \cdot 10^{-07}$	0,55	365,1

Опустим, анализ параметров эквивалентной схемы, описывающий полученные спектры, и перейдем сразу к рассмотрению характеристических значений защитного действия ИФХАН-125, представленных в Таблице 5.

Таблица 5. Характеристические значения защитного действия, рассчитанные по данным Таблицы 4.

Условия обработки	$\gamma_{\text{бл}}$	$\gamma_{\text{акт}}$	$\gamma_{\text{акт}}^*$	$\Theta\%$	$Z^*\%$
М1					
ТО без КИН	151	68,45	0,45	99,34	98,54
ИФХАН-125	6858,15	1004,77	0,15	99,99	99,91
М15					
ТО без КИН	34,41	16,47	0,48	97,07	93,23
ИФХАН-125	77,29	19,42	0,25	98,97	94,85

Сравнение характеристических значения защитного действия (Таблица 5), позволяет сделать вывод о блокировочном механизме действия как оксидных слоев, формирующихся при ТО образцов, так и адсорбционных пленок ИФХАН-125. Значения $\gamma_{\text{бл}}$ во всех случаях значительно превосходят $\gamma_{\text{акт}}^*$. При этом степень блокировки ингибитором поверхности меди М1 достигает 99,99%, а М15 – 98,97%. Этим значениям соответствуют величины Z^* , равные 99,9 и 94,85% соответственно.

Таким образом, данные спектроскопии ЭИ подтверждают высокую эффективность ИФХАН-125, как КИН коррозии меди, и свидетельствуют о блокировочном механизме действия этого ингибитора.

Выводы

- ИФХАН-125 является эффективным камерным ингибитором коррозии монолитной и гальванической меди.
- Оптимальные условия камерной обработки меди: 20 минут при температуре 150°C. Такой режим позволяет сформировать устойчивую защитную пленку без нарушения декоративных свойств поверхности.
- ИФХАН-125 формирует на поверхности меди пленки, сокращающие площадь активной поверхности металла и стабилизирующие его пассивное состояние.

Источник финансирования: Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. R.F. Mikesell, *The Global Copper Industry. Problems and Prospects*, Routledge, London, Great Britain (1988).
2. H. Lipowsky and E. Arpacı, *Copper in the automotive industry*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2007)
3. R.T. Nguyen, R.G. Eggert, M.H. Severson and C.G. Anderson, Global Electrification of Vehicles and Intertwined Material Supply Chains of Cobalt, Copper and Nickel, *Resour., Conserv. Recycl.*, 2021, **167**, 105198. doi: [10.1016/j.resconrec.2020.105198](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105198)
4. A. Elshkaki, T.E. Graedel, L. Ciacci and B.K. Reck, Copper demand, supply, and associated energy use to 2050, *Global Environmental Change*, 2016, **39**, 305–315. doi: [10.1016/j.gloenvcha.2016.06.006](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.006)
5. M. Vochozka, E. Kalinova, P. Gao and L. Smolikova, Development of copper price from July 1959 and predicted development till the end of year 2022, *Acta Montan. Slovaca*, 2021, **26**, 262–280. doi: [10.46544/AMS.v26i2.07](https://doi.org/10.46544/AMS.v26i2.07)
6. I.M. Notte and D.R. Gabe, Porosity of Electrodeposited Coatings: Its Cause, Nature, Effect and Management, *Corros. Rev.*, 1992, **10**, 217–280. doi: [10.1515/corrrev.1992.10.3-4.217](https://doi.org/10.1515/corrrev.1992.10.3-4.217)

-
7. О.А. Гончарова, О.А. Жданова, С.А. Семенов, А.О. Евсин, Н.Н. Андреев, Ю.И. Кузнецов, А.Ю. Лучкин и В.А. Мамонов, Летучие ингибиторы как средства борьбы с атмосферной и микробиологической коррозией. Коррозия: защита материалов и методы исследований, **2**, №2, 61–67 doi: [10.61852/2949-3412-2024-2-2-61-67](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2024-2-2-61-67)
 8. Н.Н. Андреев, О.А. Гончарова, Ю.И. Кузнецов и А.Ю. Лучкин, Способ защиты металлов от атмосферной коррозии. Патент РФ 2649354, 02.04.2018
 9. O.A. Goncharova, A.Yu. Luchkin, N.N. Andreev, N.P. Andreeva and S.S. Vesely, Triazole derivatives as chamber inhibitors of copper corrosion, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2018, **4**, 657–672. doi: [10.17675/2305-6894-2018-7-4-12](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2018-7-4-12).
 10. O.A. Goncharova, A.Yu. Luchkin, N.N. Andreev, O.Yu. Grafov, O.S. Makarova, I.A. Kuznetsov and S.S. Vesely, Chamber Protection of Zinc with Ethylhexanoic Acid, *Materials*, 2023, **16**, no. 10, 3679. doi: [10.3390/ma16103679](https://doi.org/10.3390/ma16103679)
 11. A.Yu. Luchkin, V.A. Luchkina, I.A. Kuznetsov, A.A. Chirkunov, O.A. Goncharova, Yu.I. Kuznetsov, S.S. Vesely and N.N. Andreev, Structure and properties of protective oleic acid films on magnesium formed upon contact treatment and chamber treatment, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2023, **2**, no. 4, 1703–1718 doi: [10.17675/2305-6894-2023-12-4-16](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-4-16)
 12. A.Yu. Luchkin, I.V. Tsvetkova, I.A. Kuznetsov, O.S. Makarova, O.A. Goncharova, N.N. Andreev and S.S. Vesely, Chamber inhibitors of steel corrosion based on lauric acid, octadecylamine, and their mixture, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2022, **4**, 1734–1748 doi: [10.17675/2305-6894-2022-11-4-21](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-4-21)
 13. O.A. Goncharova, A.Yu. Luchkin, Yu.I. Kuznetsov, N.N. Andreev, N.P. Andreeva and S.S. Vesely, Octadecylamine, 1,2,3-benzotriazole and a mixture thereof as chamber inhibitors of steel corrosion, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2018, **2**, 203–212. doi: [10.17675/2305-6894-2018-7-2-7](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2018-7-2-7)
 14. O.A. Goncharova, A.Yu. Luchkin, N.P. Andreeva, V.E. Kasatkin, S.S. Vesely, N.N. Andreev and Yu.I. Kuznetsov, Mutual Effects of Components of Protective Films Applied on Steel in Octadecylamine and 1,2,3-Benzotriazole Vapors, *Materials*, 2021, **14**, no. 23, 7181 doi: [10.3390/ma14237181](https://doi.org/10.3390/ma14237181)
 15. O.A. Goncharova, A.Yu. Luchkin, N.P. Andreeva, V.E. Kasatkin, S.S. Vesely, N.N. Andreev and Yu.I. Kuznetsov, Mutual effect of components of protective films applied on copper and brass from octadecylamine and 1,2,3-benzotriazole vapors, *Materials* 2022, **15**, 1541. doi: [10.3390/ma15041541](https://doi.org/10.3390/ma15041541)
 16. H.L. Zhang, D.Q. Zhang, L.X. Gao, Y.Y. Liu, H.B. Yan, S.L. Wei and T.F. Ma, Vapor phase assembly of benzotriazole and octadecylamine complex films on aluminum alloy surface, *J. Coat. Technol. Res.*, 2021, **18**, 435–446. doi: [10.1007/s11998-020-00405-5](https://doi.org/10.1007/s11998-020-00405-5)
 17. A.Yu. Luchkin, O.A. Goncharova, S.S. Vesely, T.T. Trang, D.D. Trung, P.N. Tu, C.N. Linh, S.G. Gubin, S.V. Bel'skii, I.K. Bel'skaya, N.N. Andreev and V.A. Karpov, Field tests of the efficiency of a mixture of octadecylamine and benzotriazole in the chamber protection of metals in the tropics, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2022, **4**, 1668–1678 doi: [10.17675/2305-6894-2022-11-4-16](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-4-16)

-
18. ГОСТ 9.305-84 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий»
 19. ОСТ 107.460092.001-86 Покрытия металлические и неметаллические неорганические.
 20. A.Yu. Luchkin, V.E. Kasatkin, N.N. Andreev, S.S. Veselyi, O.A. Goncharova and Yu.I. Kuznetsov, Analysis of the properties and mechanisms of action of chamber corrosion inhibitors based on electrochemical impedance spectra, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2024, **13**, no. 4, 1891–1907 doi: [10.17675/2305-6894-2024-13-4-1](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-4-1)
 21. A.Yu. Luchkin, O.A. Goncharova, I.A. Arkhipushkin, N.N. Andreev and Yu.I. Kuznetsov, The effect of oxide and adsorption layers formed in 5-Chlorobenzotriazole vapors on the corrosion resistance of copper, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 2020, **117**, 231–241. doi: [10.1016/j.jtice.2020.12.005](https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.12.005).

Protection of copper and electrodeposited copper coatings by a vapor-phase inhibitor based on octadecylamine and benzotriazole

A.A. Shishkin,^{1,2} A.Yu. Luchkin,¹ O.A. Goncharova,¹ O.V. Tripachev,¹
A.V. Kuzov,¹ N.N. Andreev¹ and T.A. Vagramyan²

¹ *Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences (IPCE RAS): 31-4, Leninsky prospect, 119071 Moscow, Russia.*

² *Mendeleev University of Chemical Technology, Russia, Moscow, Miusskaya sq., 9, 125047 Moscow, Russian Federation*

Abstract

The effect of hot vapors of an octadecylamine–benzotriazole mixture on the corrosion resistance of monolithic copper and electroplated copper coating was studied. It was found that the inhibitor efficiently suppresses the initiation of corrosion of both materials in fog spray. Optimal conditions for chamber treatment of copper are 20 min at 150°C. This mode enables the formation of a stable protective film without disturbing the decorative properties of the surface. It was shown that mixture inhibitor forms films on the copper surface, which reduce the active metal surface area and stabilize its passive state.

Keywords: *copper, corrosion resistance, chamber treatment, octadecylamine, benzotriazole, voltammetry, electrochemical impedance spectroscopy.*