

УДК 620.197

## Оценка эффективности мигрирующих ингибиторов коррозии по отношению к стальной арматуре в бетоне при погружении в морскую воду вблизи Кханьхоа (Вьетнам)

Као Ньят Линь,<sup>1\*</sup> Д.С. Шевцов,<sup>2\*\*</sup> Нгуен Ван Чи,<sup>1</sup> Нгуен Дык Ань,<sup>1</sup>  
Чан Ван Туан,<sup>1</sup> Ле Тхи Ми Хиен,<sup>1</sup> Донг Ван Киен,<sup>1</sup> Хо Хак Нгок,<sup>1</sup>  
Нонг Куок Куанг<sup>1</sup> и И.Д. Зарцын<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Приморское отделение, Совместный Российско-Вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр (Вьетнам, Нячанг)

<sup>2</sup> Воронежский государственный университет (Россия, г. Воронеж)

\*Email: [cnlinh0812@vrtc.org.vn](mailto:cnlinh0812@vrtc.org.vn)

### Аннотация

Два коммерческих мигрирующих ингибитора коррозии (МИК): MasterProtect 8000 CI, MasterProtect 8500 CI (MBCC Group) и один перспективный продукт, MCI-VN, протестированы для защиты стальной арматуры в бетоне при погружении в морскую воду на побережье Кханьхоа (Вьетнам) в течение 6 месяцев.

Пропитки на основе алкоксисилана MasterProtect 8000 CI и MasterProtect 8500 CI снижают биообрастание бетона примерно в два раза по сравнению с контрольными образцами без ингибиторов. Предполагается, что этот эффект связан с гидрофобизацией поверхности. Пропитка MCI-VN уменьшила биообрастание на 30%, в то время как добавление МИК в бетон при изготовлении не оказало существенного влияния на биообрастание. Коррозионное состояние арматурной стали оценивалось электрохимическими методами и визуальным осмотром стальной поверхности в соответствии с ГОСТ 31383-2008. Пассивное состояние стали наблюдалось при нанесении MCI-VN в качестве МИК на поверхность затвердевшего бетона перед воздействием морской воды. При использовании MCI-VN в качестве добавки в бетон, а также для пропиток MasterProtect 8000 CI и MasterProtect 8500 CI, электрохимические измерения показали пассивное состояние. Однако при визуальном осмотре выявлены поверхностные коррозионные пятна на арматуре, что позволяет классифицировать это состояние как нестабильное пассивное. В заключении предложены возможные направления совершенствования нормативных рекомендаций по оценке коррозионного состояния стальной арматуры и скорости коррозии, чтобы определить эффективность различных мер защиты от коррозии, включая МИК.

**Ключевые слова:** Мигрирующий ингибитор коррозии; питтинговая коррозия; стальная арматура; бетон.

Поступила в редакцию 24.09.2025 г.; После доработки 24.09.2025 г.; Принята к публикации 24.09.2025 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2025-3-3-106-120](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2025-3-3-106-120)

## Введение

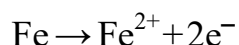
Затвердевший бетон представляет собой сложное капиллярно-пористое тело, состоящее из трех фаз: твердого вещества, воздуха и порового электролита. Поровая система бетона осуществляет обмен с окружающей средой компонентами, как в парообразном, так и в жидком состоянии. Поровый электролит образует среду, в которой развивается коррозия арматуры. [1].

В настоящее время мировой спрос на бетон составляет около 25000 тысяч тонн в год [2].

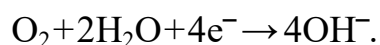
Основная причина коррозии арматуры – это накопление хлорид-ионов у поверхности арматуры под защитным слоем бетона до «критической» концентрации, вызывающей питтинговую коррозию стали [3]. В связи с этим очень важной практической задачей является защита от хлоридной коррозии и борьба с ее проявлениями.

Применение ингибиторов коррозии является одним из эффективных способов защиты. Ингибиторы коррозии могут применяться в форме добавки в свежий бетон или мигрирующих ингибиторов (МИК), которые наносятся на затвердевший бетон [4]. Ингибиторы коррозии являются продуктами много тоннажного производства как крупных международных корпораций, например Sika, BASF, MCI [5], региональных производителей [6, 7] и малых опытно-промышленных производств и лабораторий [8–10]. Продукты могут сильно отличаться по составу и свойствам, зачастую действующие компоненты не раскрываются по причине коммерческой тайны. Это усложняет процедуру сравнения защитных свойств и выбора для конкретных условий конечным потребителем, заказчиком. Как правило, оценка антикоррозионных свойств включает комплексный подход на основе нескольких независимых методов исследования [11, 12].

Коррозия стальной арматуры в бетоне протекает по электрохимическому механизму. Принято считать, что первично протекают реакции окисления железа по схеме [13]:



и восстановления окислителя (кислорода воздуха):



В связи с этим электрохимические методы оценки коррозионного состояния имеют наибольшее распространение. Ключевым преимуществом большинства таких методов является их неразрушающий характер [14]. Это позволяет проводить периодические измерения, мониторинг в течение продолжительного периода [15]. В силу важности вопроса Международный союз лабораторий и экспертов в области строительных материалов, систем и конструкций (RILEM) организовал в 1960 году комитет по коррозии арматурной стали [13].

Надежная информация об уровне и скорости разрушения поступает в ходе регулярных общих осмотров, состоящих в визуальном обследовании структуры в целом. Если окончательный вывод о состоянии конструкции или ее части не может быть сделан, назначается дополнительная экспертиза (проверка),

включающая обследование неразрушающими методами, до полного выяснения причины повреждения. По результатам работы стал технический комитет 154-ЕМС по электрохимическим методам оценки коррозии стали в бетоне.

Подготовлены, в частности, технические рекомендации по измерениям потенциала полужайки, ИПП [16], и удельного электрического сопротивления бетона, УЭСБ [17], методам локальных измерений скорости коррозии арматуры с помощью поляризационного сопротивления, ЛПС [18]. Результаты подобного рода рекомендаций послужили основой для принятия нормативных документов. Так, метод ИПП для качественной оценки коррозионного состояния арматуры включен в ряд нормативных документов на территории ряда стран и союзов, в том числе ASTM C 876:22b [19], ОДМ 218.3.001-2010 [20] и DGZfP B3:2014 [21]. Метод УЭСБ представлен в AASHTO T 358-2 [22] или ГОСТ Р 52804-2007 [23]. Процедуры для метода ЛПС регламентируются ASTM G 109:2021 [24] и ГОСТ 31383-2008 [25]. ГОСТ 31383-2008 также рекомендует к использованию методы регистрации анодных участков поляризационных кривых (АПК) и бестоковой хронопотенциометрии отключения (БХПМ). Однако все методы, так или иначе, рекомендуют сравнивать с гравиметрическими измерениями или осмотром поверхности арматуры после окончания эксперимента или после проведения измерений.

В таблице 1 включены наиболее распространенные методы коррозионного мониторинга железобетона. Если метод обладает указанным свойством в полной мере, это отмечено «++», если в недостаточной степени – «+», и если не обладает – «–» [26].

**Таблица 1.** Методы контроля коррозии арматуры в бетоне

| Параметр сравнения                                   | Метод мониторинга |        |        |        |        |             |
|------------------------------------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|-------------|
|                                                      | ИПП               | УЭСБ   | ЛПС    | АПК    | БХПМ   | Гравиметрия |
| Скорость отдельного измерения                        | ++                | ++     | ++     | +      | +      | –           |
| Быстродействие метода                                | ++                | ++     | ++     | +      | +      | –           |
| Возможность количественной оценки                    | –                 | +      | ++     | –      | –      | ++          |
| Является ли неразрушающим                            | ++                | ++     | ++     | +      | +      | –           |
| Не влияет на состояние арматуры в процессе измерения | ++                | –      | –      | –      | –      | –           |
| Включены в нормативные документы                     | 4 [19]            | 2 [22] | 3 [24] | 1 [25] | 1 [25] | 2 [25]      |

Для правильной интерпретации результатов и определения границ применимости метода необходимо сопоставление на большом числе объектов результатов ускоренных испытаний и прямого определения состояния арматуры в железобетоне на основе разрушающих методов. Несмотря на это включенные в нормативные документы методы широко используются при оценке коррозионного состояния или скорости стальной арматуры, а также эффективности различных средств защиты, в том числе ингибиторов коррозии [26].

Целью данной работы являлась оценка защитного действия электрохимическими методами двуз коммерческих МИК: MasterProtect 8000 CI [27], MasterProtect 8500 CI (MasterBuildersSolutions) [28], и перспективного

продукта MCI-VN [29] для защиты стальной арматуры в бетоне при погружении в морскую воду побережья Кханьхоа (Вьетнам) в течение 6 месяцев.

## Материалы и методы

### Материалы и образцы

Коррозионные испытания проводили на гладкой арматурной стали марки СВ300 (Romina) по TCVN 1651-2:2018 диаметром 10 мм. Элементный состав стали представлен в таблице 2. Предварительно поверхность металла травили от прокатной окалины в 24% р-ре HCl в течение 15 минут, промывали дистиллированной водой и сушили сжатым воздухом. Остатки прокатной окалины удаляли шлифованием наждачной бумагой P1000 (абразивный материал  $Al_2O_3$  с размером частиц от 4 до 20 мкм) до степени St3 по ISO 8501-1:2014 и обезжиривали ацетоном.

**Таблица 2.** Химический состав арматурной стали

| Элемент | Массовая доля (мас.%) |
|---------|-----------------------|
| Fe      | 98,515                |
| C       | 0,257                 |
| Mn      | 0,452                 |
| Si      | 0,166                 |
| P       | 0,014                 |
| S       | 0,033                 |
| Ni      | 0,135                 |
| Cr      | 0,029                 |
| Cu      | 0,321                 |
| Mo      | 0,006                 |
| Al      | 0,022                 |
| W       | 0,004                 |
| Sn      | 0,037                 |
| Co      | 0,009                 |

Образцы мелкозернистого бетона готовили на основе портландцемента РСВ40 Portland, Nghi Son (состав представлен в Таблице 3) и сухого мытого кварцевого песка фракции 0,20–0,63 мм. Соотношение массы цемента и песка составляло 1:2. Водоцементное соотношение приняли  $w/c = 0,4$ .

**Таблица 3.** Состав цемента

| Компонент | Массовая доля (мас.%) |
|-----------|-----------------------|
| $SiO_2$   | 22,0                  |
| $Al_2O_3$ | 8,0                   |
| CaO       | 62,0                  |
| $Fe_2O_3$ | 3,0                   |
| MgO       | 2,1                   |
| $SO_3$    | 2,1                   |
| $K_2O$    | 0,6                   |
| $Na_2O$   | 0,2                   |

Бетонные образцы изготавливали в виде призм размером 160×40×40 мм по

ГОСТ 31383-2008. Внутри образца (по центру) помещали подготовленный арматурный прут. МИК-добавки в бетон вводили вместе с водой затворения. МИК-пропитки наносили на поверхность образцов после твердения в стандартных условиях через 28 суток. Извлечение из опалубки производили через 7 суток. Перед началом испытаний с поверхности призм удаляли цементное молоко шлифованием диском с алмазным напылением.

Изучены два коммерческих МИК (MasterProtect 8000 CI и MasterProtect 8500 CI), а также разработка сотрудников *Приморского отделения, Совместного Российско-Вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра* под рабочим наименованием MCI-VN [29].

Расход МИК и способ введения основан на рекомендациях производителей (таблица 4). Также использовали контрольные образцы без ингибиторов. Для каждого состава строительного раствора изготавливали пять дублирующих образцов.

**Таблица 4.** Наименование образцов, и содержание МИК

| МИК                   | Производитель                          | Обозначение  | Способ применения | Расход               |
|-----------------------|----------------------------------------|--------------|-------------------|----------------------|
| Без ингибитора        | —                                      | контрольный  | —                 | —                    |
| MCI-VN                | Тропический центр                      | MCI-VN (доб) | добавка           | 1,5 мас%             |
|                       |                                        | MCI-VN(проп) | пропитка          | 0,6 л/м <sup>2</sup> |
| MasterProtect 8000 CI | Sika (ранее Master Builders Solutions) | MP80         | пропитка          | 0,6 л/м <sup>2</sup> |
| MasterProtect 8500 CI |                                        | MP85         | пропитка          | 0,6 л/м <sup>2</sup> |

### Методы исследования

Образцы-призмы погружали в морскую воду на глубину  $\approx 1$  м. Время экспозиции составило шесть месяцев. Параметры морской воды контролировали один раз в месяц. Результаты контроля представлены в таблице 5.

**Таблица 5.** Условия экспозиции бетонных образцов

| Параметр                                   | Значение  |
|--------------------------------------------|-----------|
| Температуры, °C                            | 23,8–30,5 |
| pH                                         | 8,09–8,24 |
| Соленость, ‰                               | 31,8–33,5 |
| Растворенный кислород, мг·дм <sup>-3</sup> | 6,3–8,7   |

После экспозиции образцы извлекали из воды, проводили визуальный осмотр и удаляли продукты обрастания. Оценку загрязнения поверхности (ракушками, кишечнорастворимыми и т.д.) проводили согласно ASTM D 3623-78a (Reapproved 2012) «Standard Test Method for Testing Antifouling Panels in Shallow Submergence»

Удельное электрическое сопротивление бетона ( $\rho$ ) измеряли по четырехэлектродному методу Веннера (Resipod, Proseq, Швейцария) по AASHTO T358-19. Электрохимические измерения для оценки коррозионного состояния арматурных стержней выполняли согласно ГОСТ 31383-2008 (потенциостат/гальваностат Autolab PGSTAT, Голландия). Рабочий электрод – арматурная сталь; электрод сравнения – хлорсеребряный; вспомогательный

электрод – нержавеющая сталь. Сначала фиксировали потенциал свободной коррозии ( $E_{\text{кор}}$ ). Далее регистрировали поляризационную кривую в пределах от  $E = E_{\text{кор}} - 30$  мВ до  $E = 1000$  мВ со скоростью сканирования потенциала 50 мВ/мин. После отключения поляризации регистрировали спад потенциала в течение 60 сек по шкале хлорсеребряного электрода сравнения.

Результаты испытаний представлены в виде анодных поляризационных кривых, бестоковых хронопотенциограмм отключения и фотографий стальной арматуры (визуальный контроль наличия/отсутствия коррозионных поражений). Критерии для оценки коррозионного состояния представлены в таблице 6.

**Таблица 6.** Критерии оценки коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне

| Показатель                                                                                     | Коррозионное состояние арматуры     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Плотность тока при потенциале +300 мВ<br>по шкале хлорсеребряного электрода сравнения          |                                     |
| 1) до 10 мкА/см <sup>2</sup> включительно                                                      | 1) пассивное состояние              |
| 2) от 10 мкА/см <sup>2</sup> до 25 мкА/см <sup>2</sup>                                         | 2) неустойчивое пассивное состояние |
| 3) свыше 25 мкА/см <sup>2</sup>                                                                | 3) интенсивная коррозия             |
| Потенциал через (60±5) с после отключения тока<br>по шкале хлорсеребряного электрода сравнения |                                     |
| 1) более +5 мВ                                                                                 | 1) пассивное состояние              |
| 2) менее +5 мВ                                                                                 | 2) активное состояние, коррозия     |

Образцы, находящиеся в пассивном состоянии в течение всего времени испытаний, не имеют коррозионного поражения.

## Результаты и их обсуждение

### *Влияние МИК на обрастание бетонной поверхности*

В технических описаниях на коммерческие МИК не приводятся данные об их влиянии на обрастание при контакте с морской водой. Учитывая актуальность данной проблемы для конструкций в морской воде, особенно в регионах с жарким климатом, данные тесты были проведены. Через 6 месяцев выдержки для всех типов образцов визуально наблюдали появление обрастания (рисунок 1). Наиболее распространенными обрастающими организмами были покрывающие мшанки и ракообразные (*Amphibalanus sp.*). Также присутствовали двустворчатые моллюски (*Pinctada sp.*, возможно, *Saccostrea sp.*), некоторые губки и трубчатые черви. Наиболее глубокие разрушения бетона получены в местах прикрепления моллюсков и губок.

Относительная бедность видового состава и сравнительно небольшая интенсивность обрастания, по всей видимости, обусловлены небольшой продолжительностью (около полугода) экспозиции образцов и временем экспозиции, пришедшимся на сезон дождей. В этот период происходит понижение солености поверхностного слоя воды, увеличение ее мутности за счет обильного берегового стока и штормового воздействия. Все это негативно сказывается на

организмах-фильтраторах, составляющих основу сообществ обрастания. Подтверждением тому служит тот факт, что подавляющее число особей *Amphibalanus sp.* на исследованных образцах – мертвые, что хорошо видно на представленных фотографиях.



**Рисунок 1.** Общий вид образцов мелкозернистого бетона с различными МИК после 6 месяцев экспозиции в морской воде: а – контрольный, б – MCI-VN (доб), в – MCI-VN (проп), г – MP80, д – MP85.

**Таблица 7.** Масса продуктов обрастания на поверхности образцов через 6 месяцев экспозиции

| МИК            | Контрольный | MCI-VN (доб) | MCI-VN (проп) | MP80  | MP85  |
|----------------|-------------|--------------|---------------|-------|-------|
| $\Delta m$ , г | 2,60        | 2,24         | 1,75          | 1,33  | 1,11  |
| $\Delta m$ , % | –           | –13,8        | –32,7         | –48,8 | –57,3 |

Несмотря на наличие обрастающих организмов на поверхности всех образцов, удалось выявить количественное различие. В таблице 7 представлены данные о массе продуктов обрастания после их высушивания. MCI-VN в качестве добавки способствовал уменьшению обрастания на уровне 13–14%, а в качестве пропитки – более 30%. Наибольший эффект снижения на уровне 2 раз получен для продуктов на основе силоксана MP80 и MP85. Это, вероятно, связано с наиболее высоким гидрофобизирующим эффектом от данных пропиток.

#### Оценка антикоррозионного действия МИК после экспозиции в морской воде

Удельное электрическое сопротивление бетонных образцов *контрольный* и MCI-VN (доб) (Таблица 8) отвечают высокому риску коррозии ( $<10$  кОм·см) согласно критериям [17]. Для MCI-VN (проп) значения  $\rho$  выше, но также высоким риском коррозии.

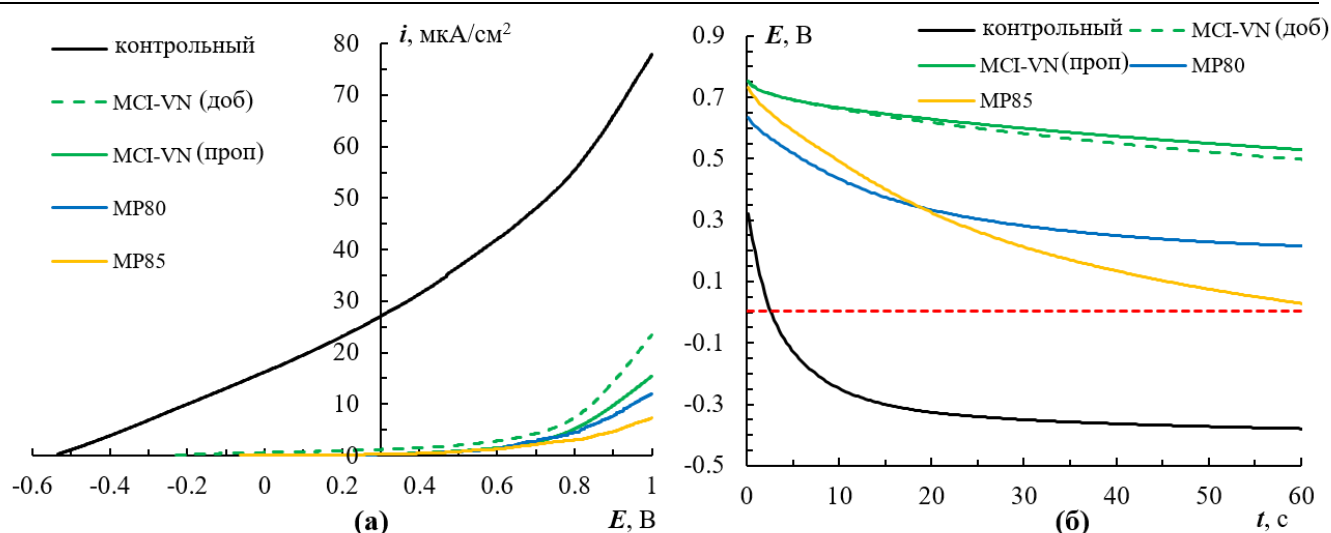
Для образцов MP80 и MP85 значения  $\rho$  заметно выше остальных MCI. Результаты соответствуют умеренному риску коррозии (интервал 10–50 кОм·см) по данным [17]. Это, вероятно, связано с действующими веществами на основе алкоксисиланов, которые гидрофобизируют поверхности и тем самым снижают содержание влаги в бетоне. Такие предположения согласуются с ранее опубликованными результатами [30, 31].

**Таблица 8.** Результаты электрохимических измерений

| МИК          | $\rho$ ,<br>кОм·см | $E_{кор}$ , мВ (х.с.э.) | $i$ , мкА/см <sup>2</sup><br>при $E = 300$ мВ (х.с.э.) | $E$ через 60с, мВ<br>(х.с.э.) |
|--------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------|
| контрольный  | 6,0                | –656                    | 27,07                                                  | –378                          |
| MCI-VN (доб) | 5,2                | –327                    | 0,90                                                   | 503                           |
| MCI-VN(проп) | 9,0                | –130                    | 0,19                                                   | 534                           |
| MP80         | 12,7               | –168                    | 0,17                                                   | 210                           |
| MP85         | 11,1               | –182                    | 0,19                                                   | 28                            |

Согласно методике ГОСТ 31383-2008 для оценки коррозионного состояния отмечали значения плотности тока ( $i$ ) на поляризационной кривой при потенциале  $E = 300$  мВ (х.с.э.). Для образцов *контрольный* плотность тока превышает пороговое значение  $i = 10$  мкА/см<sup>2</sup> (рисунок 2а, кривая 1). Релаксация  $E$  через 60 секунд после отключения поляризации достигает –370 мВ, что существенно ниже +5 мВ (рисунок 2б, кривая 1). Такие результаты свидетельствуют о коррозии арматурных стержней.

Для образцов с добавкой или пропиткой всех изученных МИК наблюдается снижение плотности тока не менее чем в 30 раз относительно *контрольный*. Значения  $E$  также принимают положительные значения во всех случаях. По критериям ГОСТ 31383-2008 коррозионное состояние характеризуется как пассивное.

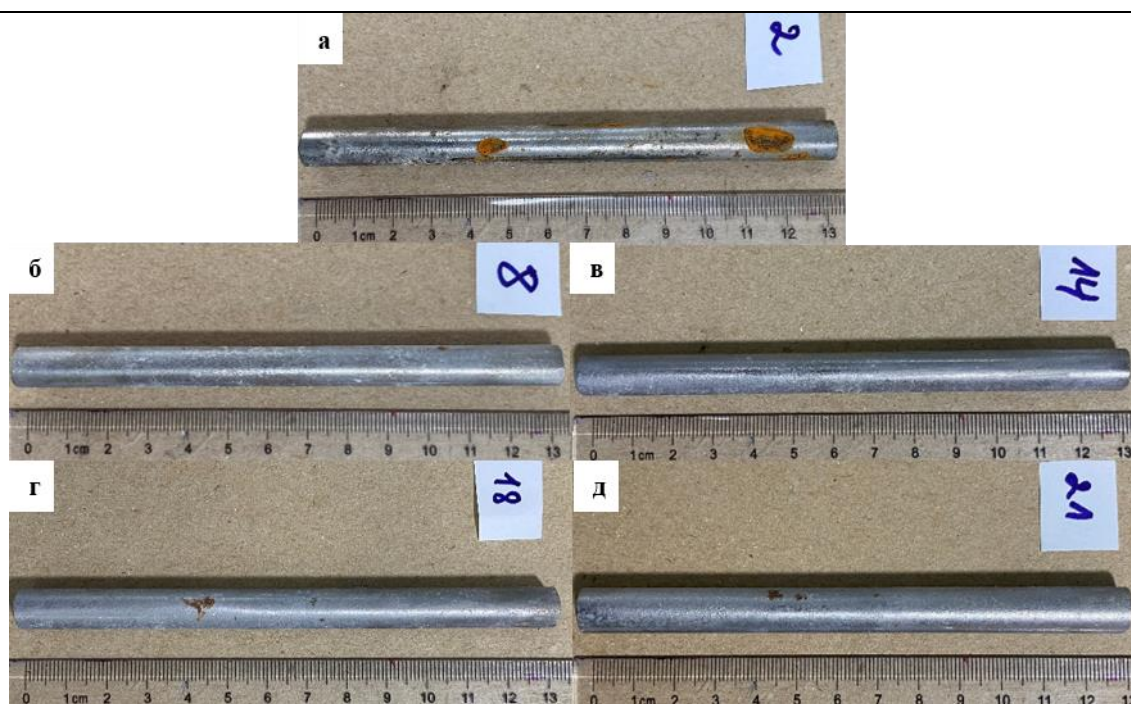


**Рисунок 2.** Анодные поляризационные кривые (а) и бестоковые хронопотенциограммы отключения (б) арматурной стали в образцах мелкозернистого бетона с различными МИК после 6 месяцев экспозиции в морской воде.

Общий вид арматурных стержней после вскрытия бетонных образцов соотносится с результатами электрохимических измерений. Все арматуры контрольный имели по несколько коррозионных пятен и язв протяжённостью не менее 4–5 мм по минимальному измерению, а также множественные питтинги, видимые в частности без увеличения (рисунок 3а). В совокупности с результатами электрохимических измерений, такой характер разрушений свидетельствует о развивающемся во времени процессе коррозии, сопровождающийся образованием новых разрушений, и развитием уже имеющихся.

Для бетонных образцов с MCI-VN (доб), MP80, MP85 как минимум на двух из трех арматур наблюдали поверхностные по 1-2 точки или пятна с продуктами коррозии размером 1-3 мм в наибольшем измерении. Они имели поверхностный характер и не распространялись вглубь металла. Вероятно, данные коррозионные разрушения сформировались в начальный момент времени при изготовлении образцов, когда имел место контакт активной поверхности металла после зачистки с поровым раствором бетонной смеси, до формирования пассивной пленки. По критериям ГОСТ 31383-2008, несмотря на результаты электрохимических измерений, коррозионное состояние арматур в перечисленных образцах характеризуется как неустойчивое пассивное состояние.

Стальные арматуры из бетонных образцов MCI-VN (доб) не имели коррозионных разрушений на поверхности. Таким образом, по данным электрохимических измерений и визуального осмотра пассивное состояние стальной арматуры сохраняется в образцах мелкозернистого бетона с пропиткой MCI-VN после экспозиции в морской воде в течение 6 месяцев.



**Рисунок 3.** Общий вид арматурных стержней, извлечённых из образцов мелкозернистого бетона с различными МИК после 6 месяцев экспозиции в морской воде: (а) контрольный, (б) MCI-VN (доб), (в) MCI-VN (проп), (г) MP80, (д) MP85.

При этом методические особенности испытаний по ГОСТ 31383-2008 не позволяют однозначно разделить изученные МИК по эффективности. Методика ГОСТ 31383-2008 предназначена для определения пассивного состояния или коррозии стальной арматуры в момент измерения, а также оценивать скорость коррозии по методу ЛПР. Однако заявляемая периодичность измерения три раза в течение шести месяцев с обязательным разрушением образцов не позволяет установить момент начала коррозии, а также надежно оценить эффективность нескольких различных ингибиторов коррозии при прочих равных условиях. С точки зрения авторов на данный момент крайне актуальной задачей является дополнение существующих стандартов или разработка новых, которые позволят осуществлять регулярный неразрушающий мониторинг, а вскрытие, визуальный осмотр и оценку скорости коррозии гравиметрическим методом выполнять по окончании эксперимента (или несколько промежуточных вскрытий). Наиболее оптимальным итогом испытаний должен стать прогноз срока службы железобетонной конструкции до потери пассивности арматуры, образования трещин в бетонном покрытии или иной стадии жизненного цикла на основе общепринятых моделей. Такой подход также должен позволить надежно разделять различные коммерческие или экспериментальные средства защиты стальной арматуры от коррозии и оценивать потенциально продления срока эксплуатации железобетонных конструкций. Ранее близкие рассуждения также встречались в работах [32].

## Выводы

1. Проведена оценка коррозионного состояния стальной арматуры в образцах мелкозернистого бетона с различными мигрирующими ингибиторами

- коррозии после экспозиции в течение 6 месяцев при погружении в морской воде побережья Кханьхоа (Вьетнам).
2. Установлено, что коммерческие МИК-пропитки MasterProtect 8000 и MasterProtect 8500 CI на основе алкоксисиланов с эффектом гидрофобизации бетона снижают массу обрастающих микроорганизмов на поверхности бетона до 2х раз. MCI-VN в виде пропитки уменьшают массу обрастания на 30%. Остальные изученные составы не оказывают заметного влияния на обрастание.
  3. По совокупности результатов электрохимических измерений и осмотра арматурных стержней пассивное состояние надежно установлено для бетонных образцов с MCI-VN в виде пропитки. Для всех остальных МИК состояние характеризуется как неустойчивое пассивное. Это связано с обнаружением единичных поверхностных пятен коррозии на арматурах без развития внутрь, которые, вероятно, образовались в начальный момент твердения образцов и не развивались во времени.
  4. Высказаны предложения о возможных путях обновления существующей нормативной базы для оценки коррозионного состояния стальной арматуры с периодическим мониторингом скорости коррозии неразрушающими электрохимическими методами исследования.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Приморского отделения, Совместного Российско-Вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра (VB.Đ1.11/23).

### Конфликт интересов

Нет.

### Список литературы

1. J.Y. Hu, S.S. Zhang, E. Chen and W.G. Li, A review on corrosion detection and protection of existing reinforced concrete (RC) structures. *Construct. Build. Mater.*, 2022, **325**, 126718. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2022.126718](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126718).
2. V.Q. Dang, Y. Ogawa, P.T. Bui and K. Kawai, Effects of chloride ions on the durability and mechanical properties of sea sand concrete incorporating supplementary cementitious materials under an accelerated carbonation condition, *Construct. Build. Mater.*, 2021, **274**, 122016. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.122016](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122016).
3. K. Osterminski, *Zur voll-probabilistischen Modellierung der Korrosion von Stahl in Beton: Ein Beitrag zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen*, Dissertation Doktor-Ingenieurs, Technischen Universität München, München, Deutschland, 2013, 211 pp. (in German). url: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1164926/1164926.pdf>.

4. O. Agboola, K.W. Kupolati, O.S.I. Fayomi, A.O. Ayeni, A. Ayodeji, J.J. Akinmolayemi, O. Olagoke, R. Sadiku and K.M. Oluwasegun, A review on corrosion in concrete structure: inhibiting admixtures and their compatibility in concrete, *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 2022, **8**, no. 1, 25. doi: [10.1007/s40735-021-00624-2](https://doi.org/10.1007/s40735-021-00624-2)
5. D. Bjegovic and B.A. Miksic, Topically Applied migrating corrosion inhibitors for Reinforced Concrete Protection. *EuroCorr 2000*, London, England, 2000.
6. I.A. Gedvillo, A.S. Zhmakina, N.N. Andreev and S.S. Vesely, Protection of rusted reinforcing steel in concrete by IFKhAN-85 inhibitor. *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2020, **9**, no. 2, 562–570. doi: [10.17675/2305-6894-2020-9-2-11](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-2-11).
7. A.S. Tarasov, M.A. Khvastin, I.A. Gedvillo, A.S. Zhmakina, S.S. Vesely, N.N. Andreev and M.A. Chayko, On the depth of penetration of migrating corrosion inhibitor Haenytext Protectoseal CI into concrete. *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2023, **12**, no. 4, 2327–2332. doi: [10.17675/2305-6894-2023-12-4-46](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-4-46).
8. W. Morris and M. Vazquez, A migrating corrosion inhibitor evaluated in concrete containing various contents of admixed chlorides, *Cem. Concr. Res.*, 2002, **32**, 259–267. doi: [10.1016/S0008-8846\(01\)00669-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00669-X).
9. H.H.B. Zheng, W.H. Li, F.B. Ma and Q.L. Kong, The effect of a surface-applied corrosion inhibitor on the durability of concrete, *Constr. Build. Mater.*, 2012, **37**, 36–40. [10.1016/j.conbuildmat.2012.07.007](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.007).
10. A.U. Malik, I. Andijani, F. Al-Moaili and G. Ozair, Studies on the performance of migratory corrosion inhibitors in protection of rebar concrete in Gulf seawater environment, *Cem. Concr. Comp.*, 2004, **26**, no. 3, 235–242. doi: [10.1016/S0958-9465\(03\)00042-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00042-8).
11. D. Shevtsov, N.L. Cao, V.C. Nguyen, Q.Q. Nong, H.Q. Le, D.A. Nguyen, I. Zartsyn and O. Kozaderov, Progress in sensors for monitoring reinforcement corrosion in reinforced concrete structures—a review, *Sensors*, 2022, **22**, no. 9, 3421. doi: [10.3390/s22093421](https://doi.org/10.3390/s22093421).
12. Q. Wang, Z. Wang, C. Li, X. Qiao, H. Guan, Z. Zhou and D. Song, Research Progress in Corrosion Behavior and Anti-Corrosion Methods of Steel Rebar in Concrete. *Metals*, 2024, **14**, no. 8, 862. doi: [10.3390/met14080862](https://doi.org/10.3390/met14080862).
13. C. Andrade, Propagation of reinforcement corrosion: principles, testing and modelling, *Mater. Struct.*, 2019, **52**, no. 1, 2. doi: [10.1617/s11527-018-1301-1](https://doi.org/10.1617/s11527-018-1301-1).
14. M. Daniyal and S. Akhtar, Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review, *J. Build. Pat. Rehab.*, 2020, **5**, no. 1, 1. doi: [10.1007/s41024-019-0067-3](https://doi.org/10.1007/s41024-019-0067-3).
15. A. Zaki, H.K. Chai, D.G. Aggelis and N. Alver, Non-destructive evaluation for corrosion monitoring in concrete: A review and capability of acoustic emission technique, *Sensors*, 2015, **15**, no. 8, 19069–19101. doi: [10.3390/s150819069](https://doi.org/10.3390/s150819069).
16. B. Elsener, C. Andrade, J. Gulikers, R. Polder and M. Raupach, Half-cell potential measurements – potential mapping on reinforced concrete structures, *Mater. Struct.*, 2003, **36**, 461–471. doi: [10.1007/BF02481526](https://doi.org/10.1007/BF02481526).
17. R. Polder, C. Andrade, B. Elsener, Ø. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert and M. Raupach, Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, *Mater. Struct.*, 2000, **33**, no. 10, 603–611. [10.1007/BF02480599](https://doi.org/10.1007/BF02480599).

18. C. Andrade and C. Alonso, Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, *Mater. Struct.*, 2004, **37**, no. 9, 623–643. doi: [10.1007/BF02483292](https://doi.org/10.1007/BF02483292).
19. ASTM C876-22b:2022, *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022, 8 p. doi: [10.1520/C0876-22B](https://doi.org/10.1520/C0876-22B).
20. ОДМ 218.3.001-2010. *Рекомендации по диагностике активной коррозии арматуры в железобетонных конструкциях мостовых сооружений на автомобильных дорогах методом потенциалов полуэлемента*: – Введ. 2011.01.01. – М. : РОСАВТОДОР, 2010. – 32 с.
21. DGZFP B 03:2021, *Electrochemical potential measurements for the detection of reinforcement steel corrosion*, German, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., 2021. (in German)
22. AASHTO T 358:2024, *Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024.
23. ГОСТ Р 52804-2007, *Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний*, Стандартинформ, Москва, 2008, 32 с.
24. ASTM G109:2023, *Standard Test Methods for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments*, American Society for Testing and Materials, 2023.
25. ГОСТ 31383-2008, *Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний*, Стандартинформ, Москва, 2008, 34 с.
26. D. Trejo, C. Halmen, K. Reinschmidt, *Corrosion performance tests for reinforcing steel in concrete*, FHWA Technical Report 0-4825-1, Texas: Texas Transportation Institute, 2009, 254 p. url: <http://tti.tamu.edu/documents/0-4825-1.pdf>.
27. url: <https://ceind.com.au/wp-content/uploads/2017/11/MasterProtect-8000CI.pdf>
28. url: <https://image.indotrading.com/co2721/pdf/p986801/masterprotect%208500ci%20tds.pdf>.
29. N.L. Cao, V.C. Nguyen, D.A. Nguyen, T.M.H. Le, Q.Q. Nong and D.S. Shevtsov, Protective performance of the migrating corrosion inhibitor MCI-VN for steel reinforcement in concrete pore solution, *Journal of Tropical Science and Engineering*, 2025, no. 39 (accepted for publication).
30. N.L. Cao, D.S. Shevtsov, T.M.H. Le, V.C. Nguyen, D.A. Nguyen, V.K. Dong, V.T. Tran, I.V. Avetisyan and I.D. Zartsyn, Assessing the efficacy of IFKhAN-80 as a migrating corrosion inhibitor for reinforcing steel in new and chloride-contaminated concrete via polarization resistance method, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2024, **13**, no 4, 2007–2021. doi: [10.17675/2305-6894-2024-13-4-6](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-4-6).
31. D.S. Shevtsov, N.L. Cao, I.D. Zartsyn, V.C. Nguyen, Q.Q. Nong, H.Q. Le, and A.T. Nguyen, Evaluation of the efficiency of the secondary corrosion protection of steel reinforcement bars in concrete using a bimetallic batch sensor, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2022, **11**, no. 3, 1228–1237. doi: [10.17675/2305-6894-2022-11-3-19](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-3-19).

- 
32. N.N. Andreev, I.A. Gedvillo, A.S. Zhmakina, D.S. Bulgakov and S.S. Vesely, Environmental testing of the efficiency of IFKhAN-80, an inhibitor for corrosion protection of steel reinforcement in concrete, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2016, 5, no. 4, 319–324. doi: [10.17675/2305-6894-2016-5-4-2](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2016-5-4-2).

## Evaluation of the effectiveness of migrating corrosion inhibitors in relation to steel reinforcement in concrete when immersed in seawater near Khanh Hoa (Vietnam)

Cao Nhat Linh,<sup>1\*</sup> D.S. Shevtsov,<sup>2</sup> Nguyen Van Chi,<sup>1</sup> Nguyen Duc Anh,<sup>1</sup>  
Tran Van Tuan,<sup>1</sup> Le Thi My Hiep,<sup>1</sup> Dong Van Kien,<sup>1</sup> Ho Khac Ngoc,<sup>1</sup>  
Nong Quoc Quang,<sup>1</sup> I.D. Zartsyn<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Coastal Branch, the Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center, 30 Nguyen Thien Thuat, Nha Trang, Vietnam*

<sup>2</sup>*Faculty of Chemistry, Voronezh State University, Universitetskaya pl. 1, Voronezh, 394018, Russia*

*\*Email: cnlinh0812@vrtc.org.vn*

### Abstract

Two commercial migrating corrosion inhibitors (MCIs): MasterProtect 8000 CI, MasterProtect 8500 CI (MBCC Group), and one promising product, MCI-VN, were tested for the protection of steel reinforcement in concrete exposed to seawater along the Khanh Hoa coast (Vietnam) over 6 months.

It was found that the alkoxysilane-based impregnations MasterProtect 8000 CI and MasterProtect 8500 CI reduced biofouling on the concrete surface by approximately twofold compared to the control samples without inhibitors. This effect is presumed to be associated with surface hydrophobization. The MCI-VN impregnation reduced biofouling by 30%, while other application methods of MCI showed no significant impact on biofouling.

The corrosion state of the reinforcing steel was assessed using electrochemical methods and visual inspection of the steel surface following GOST 31383-2008. A passive state of the steel was observed when MCI-VN was applied as migrating impregnations to the surface of hardened concrete before seawater exposure. When MCI-VN was used as an admixture during concrete preparation, and in the case of MasterProtect 8000 CI and MasterProtect 8500 CI impregnations, electrochemical measurements indicated a passive state. However, visual inspection revealed surface corrosion spots on the reinforcement, classifying the condition as unstable passive.

Possible directions for improving regulatory guidelines for assessing the corrosion state of steel reinforcement and corrosion rate have been proposed to distinguish the effectiveness of various corrosion protection measures, including MCIs.

**Keywords:** *Migrating Corrosion Inhibitor; Pitting Corrosion; Reinforcing Steel; Concrete.*