

УДК 620.197

Мигрирующие ингибиторы хлоридной коррозии стальной арматуры в бетоне. Обзор.

Као Ньят Линь,^{1*} Д.С. Шевцов,^{2**} Нгуен Ван Чи,¹ Нгуен Дык Ань,¹
Ле Хонг Куан,¹ Чан Ван Туан,¹ Нгуен Ван Чьеу,¹ Нгуен Ньы Хынг,¹
И.Д. Зарцын² и Д.В. Лебедев²

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

² Воронежский государственный университет (Россия, г. Воронеж)

*Email: cnlinh0812@vrtc.org.vn

**Email: shevtsov@chem.vsu.ru

Аннотация

Представлен обзор исследований о мигрирующих ингибиторах коррозии (МИК) для защиты стальной арматуры в бетоне при воздействии хлоридов. Рассмотрены четыре группы МИК: (1) неорганические МИК; (2) органические МИК, в т.ч. электромиграционные ингибиторы коррозии (ЭМИК); (3) смешанные МИК (смесь неорганических и органических МИК); (4) органические МИК с гидрофобными компонентами. Неорганические МИК были изучены одними из первых. Они не получили широкого распространения по причине невысокой проникающей способности, взаимодействия с цементным камнем и возможного негативного влияния на экологию. Органические МИК хорошо изучены и коммерчески доступны, особенно МИК на основе аминов и аминокислот. В большинстве случаев такие МИК эффективно снижают скорость коррозии как для новых бетонов, которые не подвергались действию хлоридов до обработки ингибитором, так и для содержащих хлориды конструкций. В единичных исследованиях сообщается также об их незначительной эффективности. Смеси органических и неорганических компонентов в МИК часто обладают синергетическим эффектом, который повышает антикоррозионное действие. Модификация органических МИК гидрофобизирующими компонентами усиливает эффективность за счет дополнительного влияния на бетонное покрытие. В целом, использование МИК представляет собой перспективный и развивающийся подход к продлению срока службы железобетонных конструкций, подверженных воздействию хлоридов.

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

Поступила в редакцию 15.04.2025 г.; После доработки 17.04.2025 г.; Принята к публикации 17.04.2025 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2025-3-2-1-23](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2025-3-2-1-23)

Введение

Бетонами называются искусственные каменные материалы, полученные в

результате затвердевания тщательно перемешанной и уплотненной смеси из минерального или органического вяжущего вещества с водой, мелкого или крупного заполнителей, взятых в определенных пропорциях [1]. Бетон обладает высокой стойкостью к сжимающим воздействиям, но небольшим сопротивлением по отношению к растягивающим напряжениям. Поэтому бетон армируют низколегированной арматурной сталью и получают железобетон (ЖБ). Сочетание физико-механических и химических свойств ЖБ позволяет создавать как относительно небольшие конструкции (фундаменты, барьеры), так и грандиозные – мосты, туннели, небоскребы, объекты портовой инфраструктуры.

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.

В настоящее время мировой спрос на бетон составляет около 25 миллиардов тонн в год [2]. Денежные затраты на поддержание безопасности ЖБ конструкций оцениваются в значительную сумму (18–21 миллиарда долларов ежегодно только в США по данным на 2014 г) [3].

В настоящее время установлены основные причины, вызывающие коррозию арматуры. Основная причина (порядка 66% случаев) – это накопление хлорид-ионов у поверхности арматуры под защитным слоем бетона до «критической» концентрации, вызывающей питтинговую коррозию стали [4].

В связи с этим очень важной практической задачей является защита от хлоридной коррозии и борьба с ее проявлениями. Для новых ЖБ конструкций накоплен значительный опыт применения специальных рецептур бетонов повышенной плотности для снижения проницаемости хлоридов, введения ингибиторов коррозии стальной арматуры при изготовлении бетона [5, 6], применения композитных и коррозионностойких арматурных стержней, нанесение защитных покрытий и пропиток [7–9] и так далее. Выбор конкретных требований определяется проектной компанией с учетом фактических условий эксплуатации и возможностей заказчика. Общие принципы защиты изложены в нормативных документах, например таких, как EN 1504-1:2019, ГОСТ 32016-2012. При правильном проектировании и качественном строительстве существует возможность обеспечивать длительные сроки безремонтной эксплуатации.

Эксплуатация ЖБ конструкций без должного качества проектирования, при наличии дефектов строительства или по причине изменения условий среды может способствовать развитию коррозии арматуры с последующим разрушением сооружения. Для устранения причин коррозии и устранения последствий требуется выбор соответствующих мероприятий.

Применение ингибиторов коррозии в обоих случаях представляет собой эффективный способ защиты. Ингибиторы коррозии укрупненно можно разделить на две группы: добавки, которые вводят непосредственно в свежий бетон для новых конструкций или ремонтных составов, и мигрирующие ингибиторы (МИК), которые наносятся на бетон и способны проникать в него. Добавки коммерчески доступны с 1950-х годов. Невозможность введения веществ этой группы в

затвердевший бетон является основной проблемой их практического использования.

В том числе по этой причине, одним из относительно новых направлений для защиты существующих ЖБ конструкций являются МИК, которые активно разрабатываются и тестируются в последние 35 лет [10]. Такие составы могут применяться на новых ЖБ конструкциях в качестве превентивной меры вторичной защиты или для уже эксплуатируемых сооружений, в том числе с выявленной коррозией стальной арматуры.

Ингибиторы коррозии представляют собой химические вещества, которые снижают скорость коррозии, когда присутствуют в системе защиты от коррозии при подходящей концентрации без существенного изменения концентрации любого другого коррозионного агента [11]. Таким образом, МИК, в узком понимании, можно считать такой ингибитор, который наносится на поверхность бетона, проникает через бетонное покрытие к поверхности стальной арматуры, взаимодействует с ней и, таким образом, замедляет или предотвращает коррозию. В ряде публикаций под МИК также рассматривается добавка, которая вводится в ремонтную смесь. Авторы таких работ подразумевают миграцию ингибитора из нового дополнительного слоя бетона через ремонтируемый бетон существующей конструкции к корродирующей арматуре. В результате достигается пассивация или снижение скорости коррозии.

Перемещение ингибиторов в бетоне от поверхности вглубь происходит по различным механизмам, включая капиллярное всасывание, диффузию и перенос паровой фазы. Эффективность различных механизмов зависит от бетонного покрытия, его пористости и содержания воды, а также от растворимости и летучести МИК [12, 13]. Надежно показано, что эффективность миграции МИК связана с толщиной бетона, водоцементным соотношением (в/ц) и прочностью бетона на сжатие [14].

Кроме того, не существует надлежащих рекомендаций для определения типа МИК, наиболее подходящего для ожидаемых конкретных условий.

При этом стоит иметь в виду, что вспомогательные или основные компоненты МИК неизбежно вступают во взаимодействие с капиллярно-поровой структурой бетона. Результат этого взаимодействия также может оказывать влияние на защитные свойства. Так по данным Триттарта [15], фосфорный компонент (кислотный компонент) образует нерастворимое соединение кальция (превращается в гель). Этот гель закупоривает поры бетона и препятствует проникновению других компонентов (с одной стороны это снижает проницаемость для агрессивных сред, а с другой – блокирует перенос компонентов МИК). Функциональные группы аминоспиртов, карбоновых кислот и гидроксильные группы, оказывают негативное воздействие на свежий бетон, химически взаимодействуя с гидратированной и негидратированной фазами цемента [16].

Силановые компоненты МИК могут увеличивать гидрофобность пор бетона, снижать содержание влаги, фактически устранять электролит и предотвращать коррозионный процесс из-за отсутствия среды для переноса ионов. Зачастую тяжело определить какой из компонентов МИК вносит основной вклад в защиту

от коррозии: непосредственно ингибитор коррозии или вспомогательное вещество (гидрофобизатор). Также показана возможность испарения летучих компонентов, например аминоспиртов, что приводило к возникновению точечной коррозии [17].

Механизм действия МИК остается предметом обсуждения. Известны предположения, что они способны образовывать адсорбированный слой на поверхности стали и препятствуют ее растворению [18], а также сообщается о возможном влиянии на кинетику анодной и / или катодной реакций [19, 20]. Некоторые исследователи сообщают, что изученные составы помогают снизить содержание свободного хлорида в бетоне и/или снизить скорость диффузии хлорида [21].

Методы оценки эффективности МИК в общем случае аналогичны тем, которые применяются для обычных ингибиторов коррозии [22]: гравиметрические измерения и визуальный осмотр арматурных стержней, неразрушающие электрохимические методы оценки скорости коррозии (поляризационное сопротивление – ПС, электрохимическая импедансная спектроскопия – ЭИС, расчет Тафелевских наклонов, метод гальваностатического импульса – ГСИ), качественная оценка коррозионного состояния (измерение потенциала полуэлемента (ИПП) и удельного электрического сопротивления бетона – УЭС), а также вспомогательные (контроль концентрации хлоридов по толщине бетонного покрытий и глубины карбонизации). Отличительной особенностью изучения МИК можно считать способы контроля глубины его проникновения в бетон и определения концентрации у поверхности стальной арматуры.

Бьегович и Микшич в докладе 2000 года [23] представили краткую хронологию появления коммерческих МИК от различных производителей с учетом их способа применения и основных компонентов (Таблица 1).

Таблица 1 – Хронология появления коммерческих МИК до 2000 г.

Дата	Производитель	Химическая основа	Способ применения
1979	GRACE	$\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$	добавка в бетон
1986	CORTEC	алканамины	добавка в бетон
1990	CORTEC	водные аминокарбоксилаты	нанесение на поверхность
1990–1995	MASTER BUILDERS	водные амины и эфиры	распыление,
			инъекционная суспензия, добавка
1993	GRACE	$\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$	нанесение на поверхность
1994	AXIM	органические +	добавка,
		неорганические смеси	нанесение на поверхность
1997	SIKA	аминоспирты	добавка,
1997	BALVAC	монофосфат натрия	нанесение на поверхность
1998	MARGEL	этаноламины	картриджи в просверленные отверстия

Несмотря на появление первых работ по МИК в 1980 годах, авторы не обнаружили обстоятельных обзорных публикаций по данной теме. При этом известны обзорные статьи по теме ингибиторов коррозии арматуры в бетоне, которые включают разделы по МИК [11, 24–28].

Цель данной работы является обобщение накопленного и опубликованного

опыта применения МИК для защиты от коррозии стальной арматуры в бетоне, вызванной хлоридами, включая как лабораторные образцы, так и готовые коммерческие продукты.

В данной работе будут рассмотрены следующие группы МИК:

1. Неорганические МИК;
2. Органические МИК, в т.ч. электромиграционные ингибиторы коррозии (ЭМИК);
3. Смешанные МИК (смесь неорганических и органических МИК);
4. Органические МИК с гидрофобными компонентами.

К глубокому сожалению авторов, большинство коммерческих ингибиторов производятся из смеси химических веществ, состав которых неизвестен и не раскрывается производителем (коммерческая тайна). В связи с этим точные рецептуры не могут быть представлены, а будут указываться основные компоненты, известные из открытых источников.

Мигрирующие ингибиторы коррозии

Неорганические МИК

МИК на основе неорганических веществ были изучены одними из первых [23]. Известны работы с испытаниями в качестве МИК арматурных стержней неорганические соединений на основе монофторфосфатов [29]. Андраде и соавторы показали, что на глубину проникновения монофторфосфатов влияют содержание влаги в зоне покрытия, реакции между монофторфосфатами и компонентами внутри бетона и проницаемость бетона. Когда бетонное покрытие не насыщено влагой, проникновение ингибитора происходит легче (глубже) за счет капиллярной абсорбции [30]. Для новых бетонов в первые месяцы после изготовления может произойти реакция между монофторфосфатами и негидратированным цементом [31]. По данным Пэйджа [32] для карбонизированного бетона с $w/c=0,8$ на глубине были обнаружены умеренные концентрации водорастворимых фосфатов и фторидов (содержание фосфата на поверхности бетона было в 10 раз выше, а фтора – в четыре раза выше, чем на глубине 20 мм). Палмер и Малрич заявляют, что нанесение монофторфосфатов в виде геля на бетонную поверхность улучшает его проникновение [33].

Монтичелли и соавторы предполагают, что использования неорганических ингибиторов на основе монофторфосфата натрия в полевых условиях приводит к замедлению коррозии и продлению срока службы ЖБ конструкции [34]. Шоссадент и соавторы предложили наносить монофторфосфат на бетонную поверхность в виде водного раствора с массовой долей от 10 до 20% [35].

Титтарелли и соавторы [36] исследовали монофторфосфат натрия в качестве пропитки бетонного покрытия. Образцы бетона подвергали циклам увлажнения / высыхания в 3,5% р-ре NaCl и контролировали коррозионные параметры методами ПС и ИПП. После активации коррозии, поверхность образцов в течение 10 дней ежедневной пропитывали 20%-ным водным раствором монофосфата. Авторы установили проникновение монофосфата на глубину до 1 см. Было выдвинуто предположение об эффективности изученного МИК только при

наличии арматурных стержней до этой глубины. Вероятно, имело место поверхностное уплотнение и за счет этого достигался некоторый защитный эффект.

Татематсу и соавторы обнаружили на границе раздела ремонтного и исходного бетона ($v/c=0,64$) значительное количество нитритов (нитрит кальция) примерно в 20 мм от границы раздела [37]. Некоторый количества нитрит-ионов обнаруживали на расстоянии до 50 мм от поверхности раздела. Пэйдж и соавторы выполнили анализ с помощью ионной хроматографии [38]. Авторы показали, что NO_2 , нанесенный на поверхность бетона, проникает более чем на 10 мм.

Ван и соавторы [39] предложили оригинальный ускоренный метод введения МИК на основе нитрита лития путем приложения давления 1–1,5 МПа и продолжительности 24–96 ч. Авторы не проводили ускоренных коррозионных испытаний, а отталкивались из известного соотношения концентраций ингибитора и активатора на уровне 0,6. В результате убедительно показана возможность повышения содержания нитритов вплоть до $0,932 \text{ кг/м}^3$ бетона на глубину до 4 см. Несмотря на хорошие результаты, данный подход требует не только специального оборудования, но и изготовления значительного количества отверстий в бетоне для размещения инъекторов.

Неорганические МИК представлены относительно небольшим количеством вариантов. Это, вероятно, связано с их небольшой проникающей способностью, вероятностью взаимодействия с компонентами цементного камня и значительной экологической нагрузкой на окружающую среду.

Органические МИК

Наиболее часто используемыми поверхностно наносимыми МИК являются соли аминов и ингибиторы на основе аминоспирта [40]. Также часто встречаются органические МИК, которые состоят из двух частей: летучей (алканоламин – основной компонент) и нелетучей (кислота – вспомогательный компонент соединения) [11].

Элзенер и соавторы [17] изучили свойства МИК в новом бетоне на основе гидроксиалкиламинов путем контроля ИПП и ГСИ. Авторы показали, что высокие концентрации (до 10%) позволяют ингибировать возникновение точечной коррозии в модельном поровом растворе с 1М NaCl. Отмечена трудность оценки эффективности МИК из-за его испарения из строительного раствора, которое приводило к потере защитных свойств.

В последующей работе изучены составы с добавлением карбоновых кислот [41]. Авторы показали, что карбоновые кислоты имеют очень низкую скорость диффузии и ни один из компонентов предложенного МИК не достиг арматурного стержня. Этим объяснена низкая эффективность.

Моррис и Васкез [42] исследовали МИК на основе алкиламиноспирта в течение 2,7 лет в бетонах прочностью 20 и 30 МПа в морской атмосфере побережья Аргентины и при погружении в 3,5 масс% р-р NaCl. Скорость коррозии оценивалась по тафелевским наклонам. Авторы пришли к выводу, что при обработке содержащего хлориды бетона, предложенный состав не оказывает защитного действия (при содержании $>0,2 \text{ масс\% Cl}^-$). Наибольший эффект

получен на менее плотных бетонах, которые были обработаны МИК до начала испытаний (эффективность до 90%). В последующей работе [43] авторы показали, что при увеличении количества ингибитора при нанесении с $0,4 \text{ кг/м}^2$ до $0,8 \text{ кг/м}^2$ достигается высокий защитный эффект уже для более прочных бетонов.

Батис и соавторы [44] изучили эффективность состава INHIB-M (на основе алканоламинов) тензометрическим методом при погружении в 3,5 масс% р-р NaCl. Получено снижение тока коррозии и потери массы на 25–30% (опыт проводился при постоянной анодной поляризации в течение 200 сут).

Малик и соавторы [45] исследовали МИК-А на основе диметиламина и МИК-В на основе триэтаномина для снижения скорости коррозии в условиях морского побережья Персидского залива. Расход каждого состава принимался равным $0,7 \text{ л/м}^2$. Авторы использовали 5 масс% р-р NaCl для имитации зоны полного погружения в морскую воду и зоны «брызг» в течение 19 мес. Скорость коррозии оценивалась по расчету Тафелевских наклонов. Отмечена эффективность предложенных составов. МИК-А показал больший защитный эффект (63–72%), в то время как для МИК-В получены существенно более низкие значения. Сравнение с летучим ингибитором коррозии VCI-C на основе толилтриазола (им покрывали арматурные стержни перед бетонированием), показало более высокую эффективность МИК.

Федрицци и соавторы [46] исследовали МИК на основе алканоламина для ремонта бетона автомагистралей. В образцы бетона предварительно вводили хлориды и, после обработки МИК, погружали в 3,5 масс% р-р NaCl. Авторы также приходят к выводу, что одновременное применение МИК с хорошим барьерным покрытием обеспечивает защиту от коррозии арматуры и позволяет восстанавливать поврежденные бетонные конструкции.

Ведалакшми и соавторы [47] получили близкие результаты при изучении МИК на основе аминоспирта (N-N-диметилэтаноламин – ингибитор, спирт – носитель, вода) методом тафелевской экстраполяции для бетонов двух разных прочностей 20 и 30 МПа при толщинах бетонного покрытия 25 и 40 мм. Предложенный состав обеспечивал эффективность на уровне до 80%. При этом в бетоне с прочностью 20 МПа пассивный слой нестабилен в присутствии 1% хлорида. Авторы пришли к выводу, что если требуется высокая эффективность, то целесообразно добавлять МИК из расчета $2,45 \text{ кг/м}^3$ вместе с бетоном/ремонтным раствором, а не наносить на бетонную поверхность. В последнем случае для образования устойчивого пассивного слоя на арматуре потребуется минимум 70–100 дней (при наличии хлоридов в бетоне до обработки).

Чжэн и соавторы [48] использовали коммерческий ингибитор коррозии на основе аминоспирта, содержащий кислотный компонент, с расходом $0,4 \text{ кг/м}^2$ для оценки влияния на проницаемость бетона. Образцы в течение всего эксперимента выдерживали в 5% р-ре NaCl. Авторы отметили снижение проницаемости для воды, хлоридов, а также углекислого газа. При этом отмечается, что эффект характерен для поверхностного слоя бетона и может со временем снижаться.

Лью и соавторы [49] исследовали МИК на основе аминоспирта и аминокарбоксилатов с расходом $0,4 \text{ кг/м}^2$. Полученным составом обрабатывали бетон прочностью 38 МПа, который содержал хлориды от 0,5 до 1,5 масс%.

Авторы в течение 28 сут контролировали коррозионное состояние методами ЭИС и ПС и получили снижение скорости коррозии на 25% для 0,5 и 1,0 масс% Cl^- , в то время как при 1,5 масс% защитный эффект не получен.

Цай и соавторы [50] изучили эффективность МИК (аминоспирт) и ZX (аминокарбоновая кислота) в ходе циклов увлажнения (10 масс% р-ром NaCl) / высыхания. Расчеты ПС и данные ЭИС соответствуют эффективности ZX на уровне 76%, а МИК – 74% после 37 циклов.

Сонг и соавторы [51] исследовали МИК PCI-2015, МИК-А (США) и МИК-В (Европа) в течение 150 сут на бетонных образцах, содержащих хлориды в количестве 0,5–1,0 масс%, а также при ремонте ЖБ акведука (Хендаохэ, Цзилинь, Китай). Расход материалов 0,2 кг/м². При измерениях по методу ПС рассчитанная средняя эффективность МИК составила 86,7% для PCI-2015, 48,5% для МИК-А и 81,9% для МИК-В. При этом также отмечено снижение проницаемости для хлоридов.

Результаты Сан и соавторы [52] показали, что коррозионная стойкость стальных стержней в бетоне значительно улучшена при нанесении коммерческих МИК Sika, произведенных в г. Шанхай (Китай), на основе аминоспиртов при дозировке 0,5 кг/м². Авторы показали, чем раньше образцы были покрыты МИК, тем выше эффективность. Эффективность составила 55,35% при нанесении покрытия МИК перед воздействием раствора 3,5 масс% NaCl . В случае обработки МИК после девятого цикла увлажнения / сушки эффективность снизилась до 3,40%.

Ван и соавторы [53] сообщили об эффективности на уровне 66–97,9% при использовании ЭИС и тафелевских наклонов, вероятно, для того же МИК производства Sika Co. Ltd, на основе аминоспиртов и органических аминов, с дозировкой 0,5 кг/м² при одновременном воздействии карбонизации и хлоридов (3,5% р-р NaCl).

Тайсс и соавторы [54] изучали МИК на основе аминкарбоксилата, при его добавлении в бетон в количестве от 0,3 до 0,6 масс%. Образцы подвергали воздействию 6% р-ра NaCl , а измерения скорости коррозии проводили по методам ПС и ИПП. Надежно показано, что дозировка 0,60% МИК имела наибольшую эффективностью 88,68% при толщине бетонного покрытия 40 мм; для 0,45% МИК эффективность составила 45%. Добавление 0,30% МИК приводило увеличению скорости коррозии.

Алимаброк и соавторы [55] изучена эффективность смешанного ингибитора коррозии на основе 2-аминоэтанол (20 масс%) и трибутилфосфата (1 мас%). Авторы показали, что состав практически не влияет на проницаемость бетона по отношению к хлоридам в ходе циклов увлажнения-высыхания при контакте с водным раствором NaCl (3,5–7 масс%), но проявляет защитное действие и имеет смешанный механизм защитного действия (на катодные и анодные участки).

Цзэн и соавторы [56] исследовали МИК производства Beijing Mengtai Building Materials с расходом 0,25–0,30 кг/м². Авторы отметили снижение коэффициента диффузии хлоридов на 62%, что заявляется как хороший защитный эффект. При этом отмечается увеличение качества бетона и предполагается рост антикоррозионных свойств, однако прямые коррозионные тесты не были

представлены.

Наиболее значительное количество исследований по теме органических МИК представлено о коммерческих продуктах производства компании Cortec (США) под торговым наименованием МИК с различными цифровыми обозначениями. Как и для ранее рассмотренных ингибиторов, точный состав является коммерческой тайной.

Исследователи одной из групп компании отметили, что новейшие МИК основаны на аминокарбоксилатах. Наиболее эффективные типы ингибиторов оказывают влияние на анодные и катодные парциальные реакции одновременно [57].

Первые доступные работы относятся к 1993 г [58], в которых изложен опыт ремонта мостового полотна с применением продуктов МИК без указания конкретного марки. Ингибитор добавляли в ремонтную бетонную смесь, из которой он мигрировал в ремонтируемый бетон, достигал арматуры и снижал скорость коррозии, ранее вызванной хлоридами. Авторы заявляют наличие защитного эффекта в течение пяти лет мониторинга путем ИПП. Авторы также предложили лабораторную установку для контроля миграции МИК на основе бетонной мембраны.

Нагаяма и соавторы [59] опубликованы результаты исследования MCI 2020 на основе смесей аминкарбоксилатов, и аминоспиртов. Измерения проводились методами ИПП, ПС и УЭС в бетоне с содержанием хлоридов 0,15 масс% и с коррозией арматуры при относительной влажности воздуха 100%. Несмотря на относительно невысокое содержание хлоридов авторы фиксируют заметные различия в скорости коррозии и приходят к выводу об эффективности изученного МИК в течение 600 сут.

Позднее Бавариан и соавторы [60] представили результаты для MCI 2020 и MCI 2020M для новых бетонов, которые выдерживали в течение одного года в 3,5 масс% р-р NaCl. Комплексом электрохимических методов (ЭИС, ИПП, ПС) установлена эффективность 77%. По расчетам авторов такой эффект увеличивает ожидаемый срок службы ЖБ конструкции на 10–15 лет. Результаты рентгеновской дифракции свидетельствуют о наличии ингибитора у поверхности арматуры (пленка аминсоединений толщиной 100 нм). Шэн и Хигс [61] с применением УФ-спектроскопии также показали способность проникновения данного состава на глубину более 7 см вглубь бетона при расходе 0,26 кг/м². При этом наибольшая концентрация наблюдалась на глубине порядка 1,3 см.

Бавариан и Райнер [62] опубликовали отчет с данными по MCI 2021 и MCI 2022. MCI 2022 представляет собой смесь аминкарбоксилатов, аминоспиртов и силоксана [63]. Новые бетонные образцы без хлоридов обрабатывали составами после твердения. Далее их выдерживали в 3,5% р-ром NaCl в течение 400 сут. Методами ИПП, ПС и ЭИС авторы показали высокие защитные свойства данных составов. Заявлено, что MCI 2022 обеспечивает высокое поляризационное сопротивление стальной арматуры, которое увеличивается в течение всего эксперимента (соответствует эффективности до 99%). Для MCI 2021 на начальном этапе получена эффективность на уровне 94%. Однако, со временем, скорость

коррозии увеличивается вплоть до активации.

В работе [64] Бавариан и Райнер также сообщают об эффективности MCI 2020M и MCI 2022 (расход 0,27 кг/м² за два слоя) при частичном погружении образцов в 3,5% р-р NaCl в течение 400 сут. При этом по методу ПС снижение скорости коррозии получено на уровне 20% (для контрольных образцов не отмечена высокая скорость коррозии).

В 2014 году авторы обобщили результаты исследований по составам MCI 2020, MCI 2020M и MCI 2022 на основе смеси аминокарбоксилатов и аминоспиров [65] и пришли к выводу, что увеличение срока службы при пропитке бетонного покрытия данными МИК может составить более 40 лет. Отмечается, что составам может потребоваться до 150 сут для достижения поверхности арматуры в бетоне прочностью 21–28 МПа (B20–B25).

Для новых версий ингибиторов MCI 2022L и MCI 2021L в аналогичных условиях получена эффективность на уровне 83% и 67% соответственно [66]. Авторы отметили, что образцы бетона с низкой плотностью (2080 кг/м³) обеспечивают ускоренное проникновение МИК к арматурным стержням и замедление коррозии. Для более плотных бетонов (2240 кг/м³) защитное действие не превышало 35% или отсутствовало.

Бьегович и Микшич [57] сообщили о четырехлетнем опыте применения MCI 2000 на основе аналогичных компонентов для защиты стальной арматуры в бетоне с 0,15 масс% хлоридов и последующей пропиткой 3,5% р-ром NaCl в течение всего срока наблюдения. Получена эффективность на уровне 83% при измерениях по методу ПС.

Холлоуэй и соавторы [67] для MCI 2005 (комбинация летучих аминов и аминокарбоксилатных соединений) оценили концентрацию в зависимости от глубины через пять лет после обработки. Оценку проводили по содержанию аминов с помощью селективного электрода. Концентрация ингибитора превышала до 10 раз значение, достаточное для защиты от коррозии, несмотря на «вымывание».

В работе [68] описан опыт использования МИК производства Cortec основе аминокарбоксилата и 40% силанового водоотталкивающего средства при ремонте моста Рэндольф-авеню в Миннесоте. По данным последующего мониторинга в течение 10 лет, с использованием методов ИПП, ПС и анализа на содержание хлоридов, получено снижение скорости коррозии на обработанных участках до 67%.

Наряду с опытом применения МИК производства Cortec, известно значительное количество работ с применением составов этого же производителя в качестве добавок в бетон [3, 69, 70].

Таким образом, органические МИК являются наиболее широко представленной группой МИК. Большинство опубликованных исследований демонстрируют высокую эффективность для защиты стальной арматуры в бетоне при действии хлоридов. Положительные результаты получены для новых ЖБ конструкций, а также уже содержащих хлориды. Однако, встречаются единичные сообщения об отсутствии защитного действия или низкой эффективности органических МИК. Вероятно, такие эффекты связаны с конкретными

рецептурами бетона (повышенная плотность, большая толщина бетонного покрытия и др.) или недостаточным расходом обработки. Однако наличие таких сообщений является очередным подтверждением необходимости индивидуального подхода к обработке ЖБ конструкций. Авторы имеют в виду, что универсальный расход может быть неэффективным или завышенным. Для качественной обработки МИК желательно проведение измерений прочности и проницаемости бетона, глубины расположения арматуры, концентрации хлоридов и т.д.

Органические электромиграционные ингибиторы коррозии (ЭМИК)

В последние годы для повышения проникающей способности МИК предложены метолы электромиграции. Во время нанесения катионы в ингибиторе коррозии перемещаются с бетонного покрытия на катод (стальную арматуру), в то время как хлорид-ионы от арматуры из бетона к внешнему аноду [26].

ЭМИК могут быть непосредственно нанесены на поверхность для нового бетонного строительства, либо для восстановления поврежденного бетона [71]. ЭМИК, как правило, содержат амин, аминоспирт и компонент, образующий соль с аминоспиртом [72].

Мангаяркараси и Муралидхаран исследовали ингибиторы, содержащие 0,1 М гуанидина, 0,1 М тиосемикарбазида, 2 М триэтанолamina и 2 М этилацетата [73]. Ускоренное введение состава производили при наложении плотности тока $0,5 \text{ А/м}^2$. Изученный ЭМИК показал эффективность 88% для различных типов цементов и независимо от содержания хлоридов в образцах. Эффективность подтверждена методами ЭИС, тафелевских наклонов и гравиметрически.

Картик и соавторы применили близкую по составу смесь из гуанидинкарбоната, тиосемикарбазида, этилацетата и триэтанолamina на бетонной плите, содержащей хлориды. Показано, что основное действие было связано с заполнением пор бетона [74].

Сюй и соавторы [75] исследовали триэтилентетраамин (ТЭТА) в хлоридно-загрязненных бетонах. Введение вещества производили путем приложения электрического поля. Одновременно с этим, отмечено извлечение хлорид-ионов из бетонного покрытия. Эффективность экстракции хлоридов, повышение pH и миграция ТЭТА увеличивались по мере увеличения плотности тока, времени обработки и водоцементного соотношения для бетона.

Фей и соавторы [76] вводили четвертичную аммониевую соль имидазолина в качестве ЭМИК (рис. 1). Авторы показали концентрирование вещества у арматуры и снижение скорости коррозии от 1,3 до 6 раз по методу ПС (эффективность до 83%) при концентрации 0,1 М в зависимости от плотности тока миграции ($1\text{--}5 \text{ А/м}^2$).

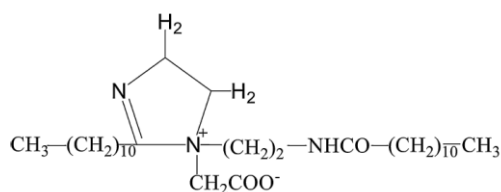


Рисунок 1. Структурная формула четвертичной аммониевой соли имидазолина [76].

Пэн и соавторы [77] также исследовали производное имидазолина, содержащее симметричную молекулярную структуру с двумя гетероциклами имидазолина и двумя длинными алкильными цепями лауриновой кислоты.

Особенность этих работ также заключается в том, что ингибитор коррозии мигрирует не с поверхности бетона, а из его объема (добавлен при изготовлении) к поверхности арматуры.

Несмотря на заявляемую эффективность ЭМИК, существует необходимость применения более сложного оборудования (в отличие от обычных распылителей низкого давления для «обычных» МИК). Также важными являются проблемы, связанные с приложением катодного тока к арматурным стержням. Перечисленные трудности могут быть существенным препятствием для широкого практического применения на реальных конструкциях такого рода составов.

Смешанные МИК

К смешанным МИК авторы относят составы, которые содержат в своем составе органические и неорганические вещества.

Больцони и соавторы [78] в течение четырех лет изучали влияние коммерческих МИК на основе амина и неорганических фосфатов (MIG-1) и алканоламина (MIG-2), выпуск которых начался в 2000 г. Контроль скорости коррозии осуществляли измерением ПС. Авторы показали, что составы способны задерживать начало коррозии только в тех случаях, когда бетон обработан до начала коррозии арматуры. Эффективность достигается за счет снижения коэффициента диффузии хлоридов, а не с увеличением критического концентрации хлоридов.

При этом МИК не приводят к сколько-нибудь заметному снижению скорости коррозии бетона, загрязненного хлоридами, независимо оттого, добавлен ли хлорид в смесь или проникает извне. Авторы отметили очень низкое проникновение ингибитора (ниже, чем для воды), которое ограничено только первыми 20 мм глубины в бетон по прошествии длительного времени.

Наиболее изученным МИК смешанного типа можно считать состав под торговым наименованием ИФХАН-80 (ИФХЭ РАН, Россия). Насколько можно судить, МИК содержит в своем составе неорганические и органические соли, а также вспомогательные компоненты для облегчения переноса вглубь бетонного покрытия [79]. Сообщается также о модификациях данного МИК под названиями ИФХАН-80М [80], а также ИФХАН-82, -83 [81]. Создатели проделали долгую работу от опытов в модельных жидких растворах [82] до натурных испытаний в качестве добавки в бетон [83] и МИК.

Показано, что оптимальное соотношение количества ингибитора и защитных

свойств достигается при расходе 0,5–0,6 л/м² бетонной поверхности [84]. Заявляется о способности проникать на глубину до 15–20 см в зависимости от плотности бетона или строительного раствора.

В работе [85] продемонстрировано заметное подавление анодного процесса после обработки ИФХАН-80 строительного раствора, в который добавляли 3 масс% NaCl при изготовлении и выдерживали во влажной атмосфере (75%) в течение 6 мес. Авторы отметили образование поверхностных пятен ржавчины, в то время как на стальное армирование в контрольных образцах без ингибитора наблюдали язвенную коррозию. В результате испытаний под навесом в городской промышленной атмосфере в зоне с умеренно-континентальным климатом (Тип атмосферы II, УХЛ-2 по ГОСТ 15150-69) в течение 12 месяцев показана способность ИФХАН-80 предотвращать образование пятен коррозии [86]. Независимой исследовательской группой электрохимическими методами с контролем ИПП и ПС показана эффективность ИФХАН-80 на уровне 83,9% и 87,5% для новых строительных растворов и при добавлении 3 мас% хлоридов (соответственно) [87]. Методика испытаний состояла из циклов увлажнения / высыхания с использованием 3% р-ра NaCl.

При сравнении с коммерческими МИК Sika Ferrogard 903 (SIKA, США) получены сопоставимые защитные свойства, а относительно MCI 2020 (Cortec, США) даже более высокие [88].

Известны также более новые разработки под наименованием ИФХАН-85, которые при меньшей концентрации подавляют коррозию стальной арматуры, однако на данный момент только в качестве добавки в новый бетон [89]

Применение смешанных МИК по представленным результатам характеризуется синергетическим эффектом, когда неорганические компоненты усиливают антикоррозионное действие органических. Содержание ПАВ облегчает транспортировку целевых компонентов к поверхности стальной арматуры и снижение скорости коррозии или пассивацию.

Органические МИК с гидрофобными компонентами.

Как было отмечено во введении, добавление в МИК компонентов, которые могут оказывать влияние на свойства бетонного покрытия, может приводить к усилению защитного эффекта. МИК на основе органофункциональных силанов (ОФС) показал многообещающие результаты [90].

Коппола и соавторы [91] сообщили о снижении диффузии хлоридов в бетоне, обработанном ОФС, на 75% независимо от массы, типа цемента и дозировки Cl, главным образом из-за водоотталкивающей природы силанов.

Гоял и соавторы [92] изучили по два коммерческих ингибитора на основе ОФС, аминокспирта и поверхностно-активных веществ и солей амина (МИК-5,6). После эксперимента в течение 70 сут эффективность составила 20–40%. Наибольшая эффективность 35–39% достигается с помощью ингибиторов коррозии на основе ОФС. Снижение эффективности наблюдается в ряду: ОФС > аминокспирты > МИК-5,6. Повышенная эффективность ОФС связана с гидрофобизирующей способностью.

Шевцов и Зарцын описали эффективность коммерческого МИК MasterProtect

8000 CI или Protectosil CIT (Master Builders, BASF), состоящего из изобутилтриэтоксисилана и 2-этиламиноэтанол. Показана способность подавлять до 90% скорость коррозии для строительных растворов с добавкой до 5 масс% NaCl при расходе состава 0,6 л/м² [93]. Отмечено увеличение УЭС более 20 раз после обработки. Другой коллектив провел [94] сравнение трех МИК (MasterProtect 8000 CI, ИФХАН-80 и MCI 2020) на бетоне класса В30 с добавлением 2,5 масс% CaCl₂ по ГОСТ 31383-2008. Авторы показали, что МИК тормозят коррозию стальной арматуры, инициированную хлоридами, в течение 90 суток. В случае инициирования при карбонизации бетона (фрагменты ребристых плит покрытия из мелкозернистого бетона возрастом около 70 лет) защитный эффект не получен.

Шевцов и соавторы также изучили эффективность нового поколения МИК под торговым наименованием MasterProtect 8500 CI (BASF), близкий по составу к MasterProtect 8000 CI [95]. Образцы нового строительного раствора с расходом 0,6 л/м². Авторы также получили рост УЭС не менее 20 раз. В течение 22 циклов погружения в 3% р-р NaCl образцы с MasterProtect 8500 CI сохранили пассивное состояние арматуры, в то время как для контрольных образцов активация наступала уже после первого погружения в хлориды и скорость коррозии увеличивалась логарифмически (контроль по методу поляризационного сопротивления). Таким образом, изученный состав не менее 22 раз увеличивает время до начала коррозии и на порядки снижает скорость коррозии.

Опубликованы результаты с высокими антикоррозионными свойствами МИК НАЕНЫТЕХ Protectoseal CI (АО «ХАНИ МАСТЕР», Россия) при расходе 0,6–0,9 л/м². Коммерческий продукт представляет собой смесь органических ингибиторов на основе аминсоединений. Авторы заявляют о способности проникать в бетоны класса В25 на глубину до 15 см, а при наличии 3 масс% хлоридов – до 6 см [96]. При тестировании по ГОСТ 31383-2008 получено снижение анодной плотности тока более 30 и 50 раз через 3 и 6 месяцев испытаний соответственно (в образцы предварительно вводили 2,5 масс% хлорида). Влияние на УЭС не известно.

Органические МИК с гидрофобизирующими компонентами характеризуются наибольшей глубиной проникновения в бетонное покрытие, одновременно с этим снижается содержание влаги в бетоне и проницаемость для хлоридов. При этом не отмечены случаи, когда при испытаниях не получена высокая эффективность защиты. С высокой долей уверенности можно предполагать, что такой тип МИК является наиболее эффективным и долговечным вариантом защиты от коррозии стальной арматуры в бетоне при воздействии хлоридов.

Заключение

Представлен литературный обзор исследований по теме МИК для защиты стальной арматуры в бетоне при воздействии хлоридов. Большинство коммерческих ингибиторов производятся из смеси химических веществ, состав которых неизвестен и не раскрывается производителем (коммерческая тайна). В связи с этим точные рецептуры не могли быть представлены.

Неорганические МИК являются одними из первых составов в данной

области. Однако они не получили широкого распространения по причине невысокой проникающей способности, взаимодействия с цементным камнем и возможного негативного влияния на экологию.

Органические МИК относятся к наиболее изученным и коммерчески доступным продуктам, особенно МИК на основе аминов и аминспиртов. Представлены обширные результаты исследований со всего мира. В большинстве случаев показана возможность эффективного снижения скорости коррозии для новых и содержащих хлориды бетонов. Однако ряд публикаций сообщает о незначительном или отсутствующем эффекте. Вероятно, это связано с характеристиками бетона (плотность, концентрация хлоридов, толщина покрытия), а также с условиями эксплуатации, при которых МИК может испаряться или вымываться в окружающую среду.

МИК на основе смеси органических и неорганических ингибиторов, а также вспомогательных веществ, характеризуются синергетическим эффектом, который приводит к повышению антикоррозионных свойств.

Дополнение органических МИК гидрофобизирующими компонентами на основе органофункциональных силанов увеличивает краевой угол смачивания в порах, уменьшает содержания влаги в бетоне и снижает проницаемость для хлоридов. Перечисленные эффекты усиливают антикоррозионный эффект за счет влияния на бетонное покрытие. Дальнейшие исследования и оптимизация рецептур МИК по-прежнему необходимы для обеспечения долговременной защиты железобетона в средах с высоким содержанием хлоридов.

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. А.Г. Зоткин, *Бетон и бетонные конструкции* – Ростов-на-Дону : Феникс, 2019, 328 с. ISBN 978-5-4323-0106-2.
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. M. Shen, A. Furman and A. Hansen, Protecting concrete reinforcement using admixture with migrating corrosion inhibitor and water repellent component, *NACE CORROSION – NACE*, 2014, **4250**, NACE-2014-4250.
4. K. Osterminski, *Zur voll-probabilistischen Modellierung der Korrosion von Stahl in Beton: Ein Beitrag zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen*: Dis., Dr.-Ing., München, 2013, 211 p.

5. M. Ormellese, M. Berra, F. Bolzoni and T. Pastore, Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures, *Cem. Concr. Res.*, 2006, **36**, no. 3, 536–547. doi: [10.1016/j.cemconres.2005.11.007](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.007).
6. J.S. Reoua and K.Y. Ann, The electrochemical assessment of corrosion inhibitor effect of calcium nitrite in blended concretes, *Mater. Chem. Phys.* 2008, **109**, 526–533. doi: [10.1016/j.matchemphys.2007.12.030](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.12.030).
7. G. Batis and P. Pantazopoulou, Advantages of the simultaneous use of corrosion inhibitors and inorganic coatings, *Cement and Concrete Technology in the 2000s Second International Symposium*. 2000, 474–483.
8. A. Brenna, S. Beretta, M. Berra, M.V. Diamanti, M. Ormellese, T. Pastore, M.P. Pedferri and F. Bolzoni, Effect of polymer modified cementitious coatings on chloride-induced corrosion of steel in concrete, *Struct. Concr.*, 2019, 1–13. doi: [10.1002/suco.201900255](https://doi.org/10.1002/suco.201900255).
9. M.V. Diamanti, A. Brenna, F. Bolzoni, M. Berra, T. Pastore and M. Ormellese, Effect of polymer modified cementitious coatings on water and chloride permeability in concrete, *Constr. Build. Mater.*, 2013, **49**, 720–728. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2013.08.050](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.050).
10. M. Ormellese, F. Bolzoni, S. Goidanich, M.P. Pedferri and A. Brenna, Corrosion inhibitors in reinforced concrete structures Part 3—migration of inhibitors into concrete, *Cor. Eng., Sci. Tech.*, 2011, **46**, no. 4, 334–339. doi: [10.1179/174327809X419230](https://doi.org/10.1179/174327809X419230).
11. T.A. Söylev and M.G. Richardson, Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report, *Constr. Build. Mater.*, 2008, **22**, no. 4, 609–622. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2006.10.013](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.10.013).
12. F. Bolzoni, S. Goidanich, L. Lazzari and M. Ormellese, Corrosion inhibitors in reinforced concrete structures. Part 2 – Repair system, *Cor. Eng., Sci. Tech.*, 2006, **41**, no. 3, 212–220. doi: [10.1179/174327806X111234](https://doi.org/10.1179/174327806X111234).
13. A. Goyal, H.S. Pouya, E. Ganjian and P. Claisse, A review of corrosion and protection of steel in concrete, *Arab. J. Sci. Eng.*, 2018, **43**, 5035–5055. doi: [10.1007/s13369-018-3303-2](https://doi.org/10.1007/s13369-018-3303-2).
14. H.E. Jamil, A. Shrir, R. Boulif, M.F. Montemor and M.G.S. Ferreira, Corrosion behaviour of reinforcing steel exposed to an amino alcohol based corrosion inhibitor, *Cem. Concr. Compos.*, 2005, **27**, 671–678. doi: [10.1016/j.cemconcomp.2004.09.019](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.019).
15. J. Tritthart, Transport of a surface-applied corrosion inhibitor in cement paste and concrete, *Cem. Concr. Res.*, 2003, **33**, 829–834. doi: [10.1016/S0008-8846\(02\)01067-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01067-0).
16. A. Tiwari, S. Goyal, V. Luxami, M.K. Chakraborty and G. Prabhakar, Assessment of corrosion inhibition efficiency of generic compounds having different functional groups in carbonated pore solution with chlorides and migration ability in concrete, *Constr. Build. Mater.*, 2021, **290**, 123275. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2021.123275](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123275).
17. B. Elsener, M. Büchler, F. Stalder and H. Böhni, Migrating Corrosion Inhibitor Blend for Reinforced Concrete: Part 1. Prevention of Corrosion, *Corrosion*, 1999, **55**, no. 12. doi: [10.5006/1.3283953](https://doi.org/10.5006/1.3283953).

18. P. Kern and D. Landolt, Adsorption of organic corrosion inhibitors on iron in the active and passive state. A replacement reaction between inhibitor and water studied with the rotating quartz crystal microbalance, *Electrochim. Acta*, 2001, **47**, no. 4, 589–598. doi: [10.1016/S0013-4686\(01\)00781-2](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(01)00781-2).
19. F. Violetta, F. Munteanu and F.D. Kinney, *Proc. Int. Conf. «Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete»* Nizza, Italy. 2000, Paper 255.
20. J.K. Buffenbarger, M.A. Miltenberger, B.D. Miller and H.L. Casal, *Proc. Int. Cong. on «Materials Week-Session E1: Corrosion of Steel in Concrete»*, Munich, Germany, 2000.
21. J.P. Broomfield, Corrosion inhibitors for steel in concrete, *Concrete*, 1999, **33**, no. 6, 44–47.
22. D. Bjegovic, B.A. Miksic and R.D. Stehly, Test protocols for migrating corrosion inhibitors (MCI) in reinforced concrete, *Mater. Cor.*, 2000, **51**, no. 6, 444–452. doi: [10.1002/1521-4176\(200006\)51:6%3C444::AID-MACO444%3E3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/1521-4176(200006)51:6%3C444::AID-MACO444%3E3.0.CO;2-O).
23. D. Bjegovic and B.A. Miksic, Topically Applied migrating corrosion inhibitors for Reinforced Concrete Protection, *EuroCorr 2000*, London, England, 2000
24. A.S. Abdulrahman, M. Ismail and M.S. Hussain, Corrosion inhibitors for steel reinforcement in concrete: A review, *Sci. Res. Essays.*, 2011, **6**, no. 20, 4152–4162. doi: [10.5897/SRE11.1051](https://doi.org/10.5897/SRE11.1051).
25. C. Venkatesh, S.K. Mohiddin and N. Ruben, Corrosion inhibitors behaviour on reinforced concrete – a review, *Sustainable Construction and Building Materials: Select Proceedings of ICSCBM 2018*, 2018, 127–134. doi: [10.1007/978-981-13-3317-0_11](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3317-0_11).
26. İ. Topçu and A. Uzunömeroğlu, Use of Corrosion Inhibitors in Reinforced Concrete, *Conference: 4. International Conference on Civil Environmental, Geology and Mining Engineering (ICOCEM- Trabzon 2019)*, 2019, 34–50.
27. F. Bolzoni, A. Brenna and M. Ormellese, Recent advances in the use of inhibitors to prevent chloride-induced corrosion in reinforced concrete, *Cem. Concr. Res.*, 2022, **154**, 106719. doi: [10.1016/j.cemconres.2022.106719](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106719).
28. S. Yuvaraj, K. Nirmalkumar, V.R. Kumar, R. Gayathzri and K. Mukilan, S. Shubikksha, Influence of corrosion inhibitors in reinforced concrete—A state of art of review, *Mater. Today: Proceedings*. 2022, **68**, 2406–2412. doi: [10.1016/j.matpr.2022.09.118](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.118).
29. A.D. Portanguen, W. Prince, T. Lutz and G. Arliguie. Detection or quantitative analysis of a corrosion inhibitor, the sodium monofluorophosphate, in concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 2005, **27**, 679–687. doi: [10.1016/j.cemconcomp.2004.11.002](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.11.002).
30. C. Andrade, C. Alonso, M. Acha and B. Malric, Na₂PO₃F as inhibitor of corroding reinforcement in carbonated concrete, *Cem. Concr. Res.*, 1996, **25**, 405–415. doi: [10.1016/S0008-8846\(96\)85028-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85028-9).
31. A. Raharinaivo and B. Malric, Performance of monofluorophosphate inhibiting corrosion of steel in reinforced concrete structures, In: *International conference on corrosion and rehabilitation of reinforced concrete structures*. Orlando, USA; 1998

-
32. C.L. Page, Aspects of the performance of corrosion inhibitors applied to reinforced concrete, In: *Proceedings of the ninth european symposium on corrosion inhibitors*. Italy: University of Ferrara; 2000, **1**, 261–276.
 33. R. Palmer and B. Malric, Surface applied inhibitors: conditions for application and control of penetration, In: *International congress on advanced materials, their processes and applications*. Munich, Germany; 2000.
 34. C. Monticelli, A. Fringnani and G. Trabanelli, Study on corrosion inhibitors for concrete application, *Cem. Concr. Res.*, 2000, **30**, no. 4, 635–642. doi: [10.1016/S0008-8846\(00\)00221-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00221-0).
 35. T. Chaussadent, V. Nobel-Pujol, F. Farcas, M. Isabelle and C. Fiaud, Effectiveness conditions of sodium monofluorophosphate as a corrosion inhibitor for concrete reinforcements, *Cem. Concr. Res.*, 2006, **36**, no. 3, 556–561. doi: [10.1016/j.cemconres.2005.09.006](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.09.006).
 36. F. Tittarelli, A. Mobili and T. Bellezze, The use of a Phosphate-based migrating corrosion inhibitor to repair reinforced concrete elements contaminated by chlorides, *IOP conference series: materials science and engineering*, IOP Publishing, 2017, **225**, no. 1, 012106. doi: [10.1088/1757-899X/225/1/012106](https://doi.org/10.1088/1757-899X/225/1/012106).
 37. H. Tatematsu and T. Sasaki, Repair materials system for chloride-induced corrosion of reinforcing bars, *Cem. Concr. Com.*, 2003, **25**, 123–129. doi: [10.1016/S0958-9465\(01\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00059-2).
 38. M.M. Page, C.L. Page, V.T. Ngala and D.J. Anstice, Ion chromatographic analysis of corrosion inhibitors in concrete, *Constr. Build. Mater.*, 2002, **16**, 73–81. doi: [10.1016/S0950-0618\(02\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00017-X).
 39. X.Y. Wang, S. Lee and H. Cho, Penetration properties and injecting conditions of corrosion inhibitor for concrete, *Constr. Build. Mater.*, 2021, **284**, 122761. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2021.122761](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122761).
 40. H. Zheng, W. Li, F. Ma and Q. Kong, The effect of a surface-applied corrosion inhibitor on the durability of concrete, *Constr. Build. Mater.*, 2012, **37**, 36–40. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2012.07.007](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.007).
 41. B. Elsener, M. Buchler, F. Stalder and H. Bohni, Migrating corrosion inhibitor blend for reinforced concrete: part 2 – Inhibitor as repair strategy, *Corrosion*, 2000, **56**, no. 7, 727–732. doi: [10.5006/1.3280576](https://doi.org/10.5006/1.3280576).
 42. 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).
 43. W. Morris, A. Vico and M. Vazquez, The performance of a migrating corrosion inhibitor suitable for reinforced concrete, *J. App. Electrochem.*, 2003, **33**, 1183–1189. doi: [10.1023/B:JACH.0000003869.70729.3c](https://doi.org/10.1023/B:JACH.0000003869.70729.3c).
 44. G. Batis, A. Routoulas and E. Rakanta, Effects of migrating inhibitors on corrosion of reinforcing steel covered with repair mortar, *Cem. Concr. Comp.*, 2003, **25**, no. 1, 109–115. doi: [10.1016/S0958-9465\(01\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00047-6).
 45. 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).

-
46. L. Fedrizzi, F. Azzolini and P.L. Bonora, The use of migrating corrosion inhibitors to repair motorways' concrete structures contaminated by chlorides, *Cem. Concr. Res.*, 2005, **35**, no. 3, 551–561. doi: [10.1016/j.cemconres.2004.05.018](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.018).
 47. R. Vedalakshmi, K. Rajagopal and N. Palaniswamy, Determination of migration efficiency of amino alcohol based migrating corrosion inhibitor through concrete, *Cor. Eng., Sci. Tech.*, 2009, **44**, no. 1, 20–31. doi: [10.1179/174327808X272405](https://doi.org/10.1179/174327808X272405).
 48. 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. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2012.07.007](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.007).
 49. Z.Y. Liu, X.G. Zhou and X.L. Li, Effect of migrating corrosion inhibitor on corrosion rate of reinforcing steel in concrete with various admixed chloride, *App. Mech. Mat.*, 2012, **204**, 3146–3150. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.3146](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.3146).
 50. J.S. Cai, C.C. Chen, J.Z. Liu and L. Shi, The protection of reinforcing steel in concrete by migrating corrosion inhibitor, *Key Eng. Mater.*, 2015, **629**, 136–143. doi: [10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.136](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.136).
 51. N. Song, W. Zixiao, L.I.U. Zhiyong, J. Zhou and D. Zheng, Study on improvement of durability for reinforced concrete by surface-painting migrating corrosion inhibitor and engineering application, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing. 2017, **167**, no. 1, 012072. doi: [10.1088/1757-899X/167/1/012072](https://doi.org/10.1088/1757-899X/167/1/012072).
 52. C. Sun, M. Sun, J. Liu, Z. Dong, L. Fan and J. Duan, Anti-Corrosion Performance of Migratory Corrosion Inhibitors on Reinforced Concrete Exposed to Varying Degrees of Chloride Erosion, *Materials*, 2022, **15**, no. 15, 5138. doi: [10.3390/ma15155138](https://doi.org/10.3390/ma15155138).
 53. H. Wang, M. Jiang, M. Hang, Y. Yang, X. Zhou, X. Liu and G. Xu, Inhibition resistance and mechanism of migrating corrosion inhibitor on reinforced concrete under coupled carbonation and chloride attack, *J. Build. Eng.*, 2023. **76**, 107398. doi: [10.1016/j.jobbe.2023.107398](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107398).
 54. A.F. Theiss, C. Effting and A. Schackow, Influence of migrating inhibitor concentration on corrosion resistance of steel reinforcement in concrete, *Engenharia Civil UM*. 2023, 15–29. doi: [10.21814/ecum.4885](https://doi.org/10.21814/ecum.4885).
 55. S.H. Altushani and M.H. Almabrok, The effect of wetting-drying cycles on the properties of organic corrosion inhibitor concrete, *Int. J. Appl. Res.*, 2024, **10**, no. 1, 175–183. Doi: [10.22271/10-1-61-475](https://doi.org/10.22271/10-1-61-475)
 56. K. Zeng, W. Sun, L. Sun and L. Liu, Experimental Study on the Effect of Corrosion-inhibiting Admixtures on Chloride Corrosion Resistance of Concrete, *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2024, **2736**, no. 1, 012042. doi: [10.1088/1742-6596/2736/1/012042](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2736/1/012042).
 57. D. Bjegovic and B. Miksic, Migrating Corrosion Inhibitor Protection of Concrete, *MP, NACE International*, 1999, **38**, no. 11.
 58. A. Eydelnant, B. Miksic and L. Gelner, Migrating Corrosion Inhibitor for Reinforced Concrete, *ConChem Journal*, 1993. no. 2, 38–43.
 59. M. Nagayama, H. Tamura and K. Shimozaawa, Corrosion monitoring using embedded minisensors on rebars in concrete rehabilitated with a VCI, *General Building Research Corporation of Japan*. 1997.

-
60. B. Bavarian and L. Reiner, Improving durability of reinforced concrete structures using migrating corrosion inhibitors, *NACE CORROSION*. 2004, NACE-04323, 11 p.
 61. M. Shen and J. Hicks, Use of UV-Spectroscopy for Detection of MCI Migration Depth in Concrete, https://www.cortecvci.com/Publications/Papers/MCI_Migration.pdf.
 62. B. Bavarian and L. Reiner, Corrosion Inhibition of Steel Rebar in Concrete by Migrating Corrosion Inhibitors, *Eurocorr 2000*. London, UK, 2000.
 63. B. Bavarian and L. Reiner, Corrosion Protection of Steel Rebar in Concrete with Optimal Application of Migrating Corrosion Inhibitors, MCI 2022, *The Cortec Corporation*, 2003, **4119**.
 64. B. Bavarian and L. Reiner, Current progress in corrosion inhibition of reinforcing steel in concrete using migrating corrosion inhibitors, *NACE CORROSION*. 2006, NACE-06347.
 65. B. Bavarian and L. Reiner, Improving durability of reinforced concrete structures using migrating corrosion inhibitors, *NACE CORROSION*. NACE, 2004, NACE-04323.
 66. B. Bavarian, A. Oluwaseye, L. Reiner and J. Meyer, Migrating corrosion inhibitors to protect reinforced concrete structures, *NACE CORROSION*. – NACE, 2018, NACE-2018-11011.
 67. L. Holloway, K. Nairn and M. Forsyth, Concentration monitoring and performance of a migratory corrosion inhibitor in steel-reinforced concrete, *Cem. Concr. Res.*, 2004, **34**, no. 8, 1435–1440. doi: [10.1016/j.cemconres.2004.01.019](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.019).
 68. M. Drew, J.J. Meyer, J. Hicks and S. Nešić, Evaluation of migrating corrosion inhibitors used in the restoration and repair of reinforced concrete structures, *NACE CORROSION*. – NACE, 2012, NACE-2012-1420.
 69. P. Vrkljan, A. Furman and C. Chandler, Measuring the Effectiveness of Migration Corrosion Inhibitors MCI by Electrochemical Techniques, *ConChem International Exhibition & Conference*. Dusseldorf, Germany, 1997.
 70. H.E. Sørensen and J.M. Frederiksen, Investigation of the effect of Cortec corrosion inhibitors MCI 2000 and MCI 2023, AECLaboratory. Report no: AECLab99-001, 1999, 40 p. <https://www.cortecvci.com/publications/technical-papers/mci-migrating-corrosion-inhibitors-papers/mcictp7/>
 71. J. Kubo, Y. Tanaka, C.L. Page and M.M. Page, Application of electrochemical organic corrosion inhibitor injection to a carbonated reinforced concrete railway viaduct, *Constr. Build. Mater.*, 2013, **39**, 2–8. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2012.05.010](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.010).
 72. V.T. Ngala, C.L. Page and M.M. Page, Investigations of an ethanolamine-based corrosion inhibitor system for surface treatment of reinforced concrete, *Mater. Corros.*, 2004, **55**, 511–519. doi: [10.1002/maco.200303768](https://doi.org/10.1002/maco.200303768).
 73. G. Mangayarkarasi and S. Muralidharan, Electrochemical protection of steel in concrete to enhance the service life of concrete structure, *Proc. Eng.*, 2014, **86**, 615–622. doi: [10.1016/j.proeng.2014.11.087](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.087).
 74. S.P. Karthick, A. Madhavamayandi, S. Murlidharan and V. Saraswathy, Electrochemical process to improve the durability of concrete structures, *J. Build. Eng.*, 2016, **7**, 273–280. doi: [10.1016/j.jobbe.2016.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.07.005).

-
75. C. Xu, W.L. Jin, H.L. Wang, Z.Y. Li and J.H. Mao, Organic corrosion inhibitor of triethylenetetramine into chloride contamination concrete by eletro-injection method, *Constr. Build. Mater.*, 2016, **115**, 602–617. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2016.04.076](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.076).
76. F.L. Fei, J. Hu, Q.J. Yu, J.X. Wei and Y.B. Nong, The effect of a tailored electro-migrating corrosion inhibitor on the corrosion performance of chloride-contaminated reinforced concrete, *Mater. Corros.*, 2015, **66**, no. 10, 1039–1050. doi: [10.1002/maco.201508231](https://doi.org/10.1002/maco.201508231).
77. C. Pan, X. Li and J. Mao, The effect of a corrosion inhibitor on the rehabilitation of reinforced concrete containing sea sand and seawater, *Materials*, 2020, **13**, no. 6, 1480. doi: [10.3390/ma13061480](https://doi.org/10.3390/ma13061480).
78. F. Bolzoni, A. Brenna, G. Fumagalli, S. Goidanich, L. Lazzari, M. Ormellese and M. Peddeferri, Experiences on corrosion inhibitors for reinforced concrete. *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2014, **3**, no. 4, 254–278. doi: [10.17675/2305-6894-2014-3-4-254-278](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2014-3-4-254-278).
79. Н.Н. Андреев, И.А. Гедвилло, А.С. Жмакина, Т.Л. Зимина, В.Ф. Степанова и Л.П. Харитоновна, Сравнение защитных свойств мигрирующих ингибиторов коррозии, *Практика противокоррозионной защиты*, 2014, no. 1, 14.
80. E.V. Starovoitova, N.N. Andreev, I.A. Gedvillo and A.S. Zhmakina, On the Use of Surfactants in the Production of Migrating Corrosion Inhibitors, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2009, **45**, no. 7, 792–795. doi: [10.1134/S2070205109070077](https://doi.org/10.1134/S2070205109070077).
81. E.V. Starovoitova, I.A. Gedvillo, A.S. Zhmakina and N.N. Andreev, NitriteBenzoate Inhibitors for Protection against Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2010, **46**, no. 7, 793–796. doi: [10.1134/S2070205110070105](https://doi.org/10.1134/S2070205110070105).
82. N.N. Andreev, E.V. Starovoitova and N.A. Lebedeva, Steel Corrosion Inhibition by Benzoic Acid Salts in Calcium Hydroxide Solutions, *Prot. Met.*, 2008, **44**, no. 7, 688–691. doi: [10.1134/S0033173208070072](https://doi.org/10.1134/S0033173208070072).
83. I.A. Gedvillo, A.S. Zhmakina, N.N. Andreev, S.S. Veselyi, V.A. Karpov and D.S. Mikurov, Field tests of the efficiency of the corrosion inhibitor IFKhAN-80 for reinforcement steel in concrete under tropical conditions. 1. Contact protection, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2023, **12**, no. 4, 1408–1416. doi: [10.17675/2305-6894-2023-12-4-3](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-4-3).
84. N.N. Andreev, D.S. Bulgakov, I.A. Gedvillo, A.S. Zhmakina and S.S. Vesely, On penetration of IFKhAN-80 migrating corrosion inhibitor into cement stone, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2014, **3**, no. 4, 238–245. doi: [10.17675/2305-6894-2014-3-4-238-245](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2014-3-4-238-245).
85. И.А. Гедвилло, А.С. Жмакина, Е.В. Старовойтова, В.Ф. Степанова, Т.Л. Зимина и Л.П. Харитоновна, О влиянии ингибитора ИФХАН-80 на коррозионно-электрохимическое поведение арматурной стали в бетоне, *Коррозия: материалы, защита*, 2012, no. 12, 15–16.
86. 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).

-
87. 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).
88. Н.Н. Андреев, Д.С. Булгаков, И.А. Гедвилло и А.С. Жмакина, О проникновении в цементный камень мигрирующего ингибитора коррозии ИФХАН-80, *Коррозия: материалы, защита*, 2014, **12**, 24–28.
89. 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).
90. N.S. Berke, B.E. Bucher, K.M. Ade and P.K. DeNicola, Organofunctional silane inhibitor surface treatment of concrete for corrosion, *Transp. Res. Rec.*, 2016, **2550**, 115–122. doi: [10.3141/2550-15](https://doi.org/10.3141/2550-15).
91. L. Coppola, D. Coffetti, E. Crotti, G. Gazzaniga and T. Pastore, Chloride diffusion in concrete protected with a silane-based corrosion inhibitor, *Materials*. 2020, **13**, 2001. doi: [10.3390/ma13082001](https://doi.org/10.3390/ma13082001).
92. A. Goyal, E. Ganjian, H.S. Pouya and M. Tyrer, Inhibitor efficiency of migratory corrosion inhibitors to reduce corrosion in reinforced concrete exposed to high chloride environment, *Constr. Build. Mater.*, 2021, **303**, 124461. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2021.124461](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124461).
93. D.S. Shevtsov and I.D. Zartsyn, Evaluation of the effectiveness of migrating corrosion inhibitors and hydrophobizers for protection against corrosion of steel reinforcement in concrete using bimetallic batch sensor, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2018, **7**, no. 3, 427–442. doi: [10.17675/2305-6894-2018-7-3-12](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2018-7-3-12).
94. З.У. Беппаев, Л.Х. Аствацатурова, С.А. Колодяжный, С.А. Вернигора и В.В. Лопатинский, Определение способности мигрирующих ингибиторов коррозии стали пассивировать корродирующую арматуру в железобетонных конструкциях, *Бетон и железобетон*, 2023, no. 5/6 (619), 33–43. doi: [10.37538/0005-9889-2023-5/6\(619\)-33-43](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6(619)-33-43).
95. D.S. Shevtsov, N.L. Cao, I.D. Zartsyn, V.C. Nguyen, Q.Q. Nong, H.Q. Le, D.A. Nguyen, E.S. Komarova, D.A. Zhikhareva, O.A. Kozaderov 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).
96. 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 Haenytex 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).

Migrating inhibitors of chloride corrosion of steel reinforcement in concrete. Review.

N.L. Cao,^{1*} D.S. Shevtsov,^{2**} V.C. Nguyen,¹ D.A. Nguyen,¹ L.H. Quan,¹
V.T. Tran,¹ N.V. Trieu,¹ N.H. Nguyen,¹ I.D. Zartsyn² and D.V. Lebedev²

¹Seaside Branch, Joint Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center
(Nha Trang, Vietnam)

²Voronezh State University (Voronezh, Russia)

*Email: cnlinh0812@vrtc.org.vn

**Email: shevtsov@chem.vsu.ru

Abstract

A review of studies on migrating corrosion inhibitors (MCI) for the protection of steel reinforcement in concrete when exposed to chlorides is presented. Four MCI groups are considered: (1) Inorganic MCI; (2) Organic MCI, including electromigration corrosion inhibitors (EMCI); (3) Mixed MCI (a mixture of inorganic and organic MCI); (4) Organic MCI with hydrophobic components. Inorganic MCI were among the first to be studied. They are not widely used due to their low penetrating power, interaction with cement stone and possible negative impact on the environment. Organic MCI are well studied and commercially available, especially MCI based on amines and amino alcohols. In most cases, such mics effectively reduce the rate of corrosion both for new concretes that were not exposed to chlorides before treatment with an inhibitor, and for structures containing chlorides. Isolated studies have also reported their low effectiveness. Mixtures of organic and inorganic components in MCI often have a synergistic effect, which increases the anticorrosive effect. Modification of organic MCI with hydrophobic components enhances efficiency due to the additional effect on the concrete coating. In general, the use of MCI represents a promising and developing approach to prolonging the service life of reinforced concrete structures exposed to chlorides.

Keywords: *Migrating corrosion inhibitor; pitting corrosion; steel reinforcement; concrete.*