

3.У. БЕППАЕВ[✉], Л.Х. АСТВАЦАТУРОВА, С.А. КОЛОДЯЖНЫЙ,
С.А. ВЕРНИГОРА, В.В. ЛОПАТИНСКИЙ

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт
бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»,
2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПОСОБНОСТИ МИГРИРУЮЩИХ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ СТАЛИ ПАССИВИРОВАТЬ КОРРОДИРУЮЩУЮ АРМАТУРУ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Аннотация

Введение. Коррозионное состояние стальной арматуры в железобетонных конструкциях и изделиях является основным фактором, определяющим их несущую способность и долговечность. Щелочность поровой жидкости бетона (при $\text{pH} > 11,8$) в железобетонных конструкциях и изделиях в обычных условиях обеспечивает пассивное состояние стальной арматуры. При наличии или при попадании в бетон хлорид-, сульфат- и других аналогичных ионов стальная арматура железобетонных конструкций и изделий депассивируется, несмотря на значение $\text{pH} > 11,8$, и начинает корродировать. Кроме этого, депассивация и последующая коррозия стальной арматуры происходят при карбонизации (нейтрализации) защитного слоя бетона вследствие снижения значения $\text{pH} < 11,8$. Одним из перспективных вариантов замедления или прекращения процессов коррозии стальной арматуры в настоящее время является применение мигрирующих ингибиторов коррозии стали.

Целью работы являлось получение экспериментальных данных по выявлению способности мигрирующих ингибиторов коррозии стали тормозить или полностью прекращать коррозию арматуры в железобетонных конструкциях и изделиях, инициированную наличием в бетоне хлорид-ионов (Cl^-) или нейтрализацией защитного слоя бетона по отношению к стальной арматуре.

Материалы и методы. Для проведения испытаний были использованы следующие виды мигрирующих ингибиторов коррозии стали:

- Cortec MCI-2020 (производитель ООО «КОРТЕК РУС»(КОРТЕК), поставщики ООО «Эттрилат», ООО «МОНУМЕНТ»);
- ИФХАН-80 (производитель и поставщик ООО «ИФХАН»);
- Basf Master-Protect 8000 CI (прежнее название Protectosil® CIT. Поставщики ООО «МБС Строительные системы», ООО «МПКМ», ООО «ЛКМ-ФЛОТ»).

Определение способности мигрирующих ингибиторов коррозии стали тормозить или полностью прекращать коррозию арматуры проводили ускоренными электрохимическими методами исследования в соответствии с ГОСТ 31383-2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний».

Результаты. Все три типа мигрирующих ингибиторов коррозии стали к возрасту 90 суток тормозят коррозию стальной арматуры, иницииированную наличием в бетоне хлорид-ионов. Все три типа мигрирующих ингибиторов коррозии стали к возрасту 30 суток не тормозят коррозию стальной арматуры, иницииированную карбонизацией бетона.

Выводы. По результатам проведенной работы выявлено, что способность мигрирующих ингибиторов коррозии стали тормозит коррозию стальной арматуры, иницииированную наличием в бетоне хлорид-ионов, при этом коррозию стальной арматуры, иницииированную карбонизацией бетона мигрирующих ингибиторов коррозии стали, не замедляют и не прекращают.

Ключевые слова: коррозия стальной арматуры, мигрирующие ингибиторы коррозии стали, хлорид-ионы, карбонизация бетона, значение pH

Для цитирования: Беппаев З.У., Аствацатурова Л.Х., Колодяжный С.А., Вернигора С.А., Лопатинский В.В. Определение способности мигрирующих ингибиторов коррозии стали пассивировать корродирующую арматуру в железобетонных конструкциях // Бетон и железобетон. 2023. № 5/6 (619). С. 33–43. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6\(619\)-33-43](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6(619)-33-43)

Вклад авторов

Беппаев З.У. – руководство работой, анализ результатов, подготовка статьи.

Аствацатурова Л.Х. – анализ результатов, подготовка и оформление статьи.

Колодяжный С.А. – выполнение экспериментальной части, подготовка статьи.

Вернигора С.А., Лопатинский В.В. – выполнение экспериментальной части.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.11.2023

Поступила после рецензирования 07.12.2023

Принята к публикации 14.12.2023

Z.U. BEPPAEV[✉], L.H. ASTVATSATUROVA, S.A. KOLODYAZHNIY,
S.A. VERNIGORA, V.V. LOPATINSKIY

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev,
JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow,
109428, Russian Federation

DETERMINATION OF THE ABILITY OF MIGRATING STEEL CORROSION INHIBITORS TO PASSIVATE CORRODING REINFORCEMENT IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Abstract

Introduction. The corrosion condition of steel reinforcement in reinforced concrete structures and products is the main factor determining their bearing capacity and durability. The alkalinity of the pore liquid of concrete (at pH > 11.8) in reinforced concrete structures and products under normal conditions ensures the passive state of steel reinforcement. In the presence or when chloride, sulfate and other analogous ions enter the concrete, the steel reinforcement of reinforced concrete structures and products de-passivates, despite the pH value > 11.8, and begins to corrode. In addition, depassivation and subsequent corrosion of steel reinforcement occur during carbonation (neutralization) of the protective layer of concrete due to a decrease in pH < 11.8. One of the promising options for slowing down or stopping the corrosion processes of steel reinforcement is currently the use of migrating corrosion inhibitors.

The aim of the work was to obtain experimental data on the ability of migrating steel corrosion inhibitors to inhibit or completely stop the corrosion of reinforcement in reinforced concrete structures and products initiated by the presence of chloride ions (Cl⁻) in concrete or neutralization of the protective layer of concrete in relation to steel reinforcement.

Materials and methods. The following types of migrating steel corrosion inhibitors were used for testing:

- Cortec MCI-2020 (manufacturer – KORTEK RUS (KORTEK) LLC, suppliers – Ettrilat LLC, MONUMENT LLC);
- IFKHAN-80 (manufacturer and supplier – IFKHAN LLC);
- Basf Master-Protect 8000 CI (former name Protectosil® CIT. Suppliers – MBS Construction Systems LLC, MPKM LLC, LKM-FLEET LLC).

The determination of the ability of migrating steel corrosion inhibitors to inhibit or completely stop the corrosion of reinforcement was carried out by accelerated electrochemical research methods in accordance with State Standard 31383-2008 "Protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion. Test methods".

Results. All three types of migrating steel corrosion inhibitors inhibit corrosion of steel reinforcement initiated by the presence of chloride ions in concrete by the age of 90 days. All three types of migrating steel corrosion inhibitors by the age of 30 days do not inhibit the corrosion of steel reinforcement initiated by concrete carbonation.

Conclusions. According to the results of the work, it was revealed that the migrating steel corrosion inhibitors inhibit the corrosion of steel reinforcement initiated by the presence of chloride ions in concrete, while the corrosion initiated by the carbonation of concrete is not slowed down or stopped by migrating steel corrosion inhibitors.

Keywords: corrosion of steel reinforcement, migrating steel corrosion inhibitors, chloride ions, concrete carbonation, pH value

For citation: Beppaev Z.U., Astvatsaturova L.H., Kolodyazhniy S.A., Vernigora S.A., Lopatinskiy V.V. Determination of the ability of migrating steel corrosion inhibitors to passivate corroding reinforcement in reinforced concrete structures. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2023, no. 5/6 (619), pp. 33–43. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6\(619\)-33-43](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6(619)-33-43)

Author contribution statements

Beppaev Z.U. – work management, analysis of results, preparation of the article.

Astvatsaturova L.H. – analysis of the results, preparation and design of the article.

Kolodyazhniy S.A. – execution of the experimental part, preparation of the article.

Vernigora S.A., Lopatinskiy V.V. – execution of the experimental part.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 10.11.2023

Revised 07.12.2023

Accepted 14.12.2023

Введение

Коррозионное состояние стальной арматуры в железобетонных конструкциях и изделиях является основным фактором, определяющим их несущую способность и долговечность. Щелочность поровой жидкости бетона (при $\text{pH} > 11,8$) в железобетонных конструкциях и изделиях в обычных условиях обеспечивает пассивное состояние стальной арматуры. При наличии или при попадании в бетон хлорид-, сульфат- и других аналогичных ионов стальная арматура железобетонных конструкций и изделий депассивируется, несмотря на значение $\text{pH} > 11,8$, и начинает корродировать. Кроме этого, депассивация и последующая коррозия стальной арматуры происходят при карбонизации (нейтрализации) защитного слоя бетона вследствие снижения значения $\text{pH} < 11,8$.

В настоящее время стальная арматура железобетонных конструкций и изделий большинства зданий и сооружений (в том числе объектов культурного наследия и памятников истории и культуры), построенных в XIX–XX веках, находится в депассивированном состоянии и подвергается различным видам коррозии. Ремонт железобетонных конструкций и изделий с депассивированной и корродирующей арматурой производится, как правило, методом удаления (демонтажа) защитного слоя бетона до полного оголения стальной арматуры. Далее производится очистка и обработка корродированной арматуры различными преобразователями ржавчины и восстанавливается защитный слой бетона с применением дорогостоящих ремонтных составов. Применение такого метода при ремонте железобетонных конструкций малой толщины (полки в ребристых плитах перекрытий, пустотные плиты перекрытий, узкие ригели и балки, капители и консоли колонн и т. п.) технологически крайне затруднительно и требует больших материальных затрат. Кроме этого, при производстве таких работ на конструкции действуют ударно-импульсные нагрузки, которые инициируют образование трещин и других повреждений конструкций.

Для решения этих проблем в развитых странах мира, в том числе в Российской Федерации, интенсивно развивалась идея создания мигрирующих ингибиторов коррозии стали, способных диффундировать через толщу бетона к поверхности арматуры и замедлить или полностью остановить ее коррозию.

Впервые мигрирующие ингибиторы коррозии стали были применены американской фирмой Cortec Corporation. В СССР исследования и разработка эффективных ингибиторов коррозии стали велись с середины 1950-х годов [1]. Исследования мигрирующих ингибиторов коррозии стали проводились в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина – ИФХЭ РАН [2]. В ходе проведения исследований процессов атмосферной коррозии металлов были синтезированы летучие ингибиторы коррозии стали, способные адсорбироваться на поверхности металлов и замедлять их коррозию.

В процессе дальнейших исследований были синтезированы мигрирующие ингибиторы коррозии стали на основе водных растворов карбоксилатных ингибиторов и их смесей с традиционными для строительной области нитритами, модифицированных добавками ПАВ. Это оказало значительное влияние на практику противокоррозионной защиты железобетонных конструкций, повысило глубину проникновения мигрирующих ингибиторов коррозии и улучшило их технологические характеристики.

В настоящее время в нашей стране появились и применяются отечественные разработки. Ведущим производителем мигрирующих ингибиторов коррозии в нашей стране является ООО «ИФХАН».

Мигрирующие ингибиторы коррозии стали (по данным рекламных буклетов производителей и поставщиков), в отличие от известных (не мигрирующих) ингибиторов, обладают способностью диффундировать (мигрировать) вглубь железобетонной конструкции или изделия. Процесс диффузии мигрирующих ингибиторов коррозии стали осуществляется при их нанесении на поверхность железобетонной конструкции или изделия, а также при добавлении их в используемую ремонтную смесь. Достигая поверхность стальной арматуры, мигрирующие ингибиторы должны замедлять или полностью останавливать коррозию стальной арматуры в эксплуатируемых железобетонных конструкциях и изделиях.

Современные мигрирующие ингибиторы коррозии стали представляют собой комплексные соединения, состоящие из смеси высокоеффективных ингибиторов (замедлителей) коррозии, взаимоусиливающих защитное действие друг друга, и дополнительно содержащие органические присадки проникающего действия. Представленные на рынке мигрирующие ингибиторы коррозии стали представляют собой жидкости от прозрачного до желтоватых цветов. При нанесении на поверхность железобетонной конструкции или изделия либо добавлении ингибитора в используемые ремонтные смеси ингибитор впитывается в бетонный камень, достигает арматуры, адсорбируется на ней и, образуя наноразмерные защитные слои, способствует торможению коррозионного разрушения металла.

Учитывая информацию из рекламных буклетов производителей и поставщиков, можно выделить следующие преимущества мигрирующих ингибиторов коррозии стали:

- не меняют внешний вид и структуру бетона;
- не влияют на прочность, паропроницаемость и морозостойкость бетона;
- не снижают сцепление бетона с арматурой;
- совместимы с любым бетоном на портландцементе, включая составы с добавками-модификаторами;
- наносятся на поверхность конструкций и обладают проникающим действием;

- предотвращают развитие имеющихся очагов коррозии и появление новых;
- образуют защитную пленку на арматуре;
- снимают проблему непосредственного нанесения антикоррозионного покрытия на арматуру;
- представляют собой материалы на водной базе и не токсичны;
- просты в применении (нанесении) и экономичны;
- увеличивают срок службы железобетонных конструкций и изделий.

При перечислении положительных характеристик мигрирующих ингибиторов коррозии стали их производители и поставщики зачастую в рекламных буклетах делают сноски, которые в принципе снимают с них ответственность в случае несоответствия декларируемых свойств мигрирующих ингибиторов коррозии стали фактически полученным при их использовании результатам. Кроме этого, в литературных источниках очень мало информации о результатах исследований свойств мигрирующих ингибиторов коррозии стали. Таким образом, вопросы, связанные с использованием мигрирующих ингибиторов коррозии стали для прекращения или замедления скорости коррозии арматуры в эксплуатируемых железобетонных конструкциях и изделиях, в настоящее время являются в достаточной степени актуальными и требуют детального изучения.

Цель

Целью работы являлось получение экспериментальных данных по выявлению способности мигрирующих ингибиторов коррозии стали тормозить или полностью прекращать коррозию арматуры в железобетонных конструкциях и изделиях, иницииированную наличием в бетоне хлорид-ионов (Cl^-) или нейтрализацией защитного слоя бетона по отношению к стальной арматуре.

Материалы и методы

Для проведения испытаний были использованы следующие виды мигрирующих ингибиторов коррозии стали:

- Cortec MCI-2020: производитель ООО «КОРТЕК РУС» (КОРТЕК), поставщики ООО «Эттрилат», ООО «МОНУМЕНТ»;
- ИФХАН-80: производитель и поставщик ООО «ИФХАН»;
- Basf Master-Protect 8000 Cl (прежнее название Protectosil® CIT): поставщики ООО «МБС Строительные системы», ООО «МПКМ», ООО «ЛКМ-ФЛОТ».

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены три вида (типа) образцов.

1. В лабораторных условиях были изготовлены бетонные (без арматурных стержней) опытные образцы класса В30 размерами $70 \times 70 \times 70$ мм. На этих образцах определяли прочность, плотность и водопоглощение бетона. Общий вид образцов приведен на рис. 1.

2. В лабораторных условиях были изготовлены бетонные опытные образцы в виде балок-призм с размерами $70 \times 70 \times 140$ мм, армированные стальными стержнями класса А240 диаметром 5 и длиной (120 ± 5) мм. Поверхность стержней, включая торцы, была отшлифована абразивной шкуркой до 7-го класса чистоты и перед заделкой в бетон обезжирена ацетоном. Стержни укладывали параллельно продольной оси симметрии образцов из бетона так, чтобы защитный слой бетона по всей длине стержней был равен (30 ± 3) мм. Состав бетона этих образцов был идентичен составу бетона для неармированных образцов. Для депассивации и инициирования коррозии стальных стержней в бетонную смесь был введен хлористый кальций в количестве 2,5 % от массы цемента. На изготовленных таким образом образцах проводились электрохимические исследования. Общий вид образцов приведен на рис. 2 и 3.

3. Из сносимых по программе реновации домов (в г. Москве возрастом около 70 лет) были отобраны фрагменты ребристых плит покрытия из мелкозернистого бетона. Из этих фрагментов были изготовлены (выпилены) образцы с одним арматурным стержнем с размерами от $50 \times 50 \times 70$ до $70 \times 70 \times 150$ мм. Торцы образцов с оголенной арматурой парофилировались. В боковых гранях образцов защитный слой бетона составлял от 25 до 50 мм. Стержни в образцах были класса А240 диаметром 4 мм. Защитный слой бетона был полностью карбонизирован, поверхность арматурных стержней частично была покрыта равномерной коррозией. На этих образцах проводились электрохимические исследования. Общий вид образцов приведен на рис. 4 и 5.

Изготовленные в лаборатории образцы (размерами $70 \times 70 \times 70$ и $70 \times 70 \times 140$ мм) подвергались тепловлажностной обработке с режимом 2 ч (период предварительного выдерживания и период подъема температуры) + 8 ч (период изотермического прогрева) + 3 ч (период охлаждения) при температуре $t = 60\text{--}65^\circ\text{C}$.

В лабораторных условиях всего было изготовлено 9 образцов с размерами $70 \times 70 \times 70$ мм и 27 образцов с размерами $70 \times 70 \times 140$ мм. Часть образцов с размерами $70 \times 70 \times 140$ мм (в количестве 9 штук) рассматривалась как контрольные образцы, на них мигрирующие ингибиторы коррозии стали не наносили. На вертикальные грани остальных образцов (в количестве по 6 штук) наносились исследуемые мигрирующие ингибиторы коррозии стали.

Из фрагментов железобетонных плит с возрастом около 70 лет с карбонизированным защитным слоем бетона были изготовлены 15 образцов. Часть этих образцов (в количестве 6 штук) рассматривалась как контрольные образцы, на них мигрирующие ингибиторы коррозии стали не наносились. На все грани остальных образцов (в количестве по 3 штук) наносились исследуемые мигрирующие ингибиторы коррозии стали.



Рис. 1. Общий вид образцов с размерами $70 \times 70 \times 70$ мм без арматурных стержней для определения прочности, плотности и водопоглощения бетона

Fig. 1. General view of samples with dimensions of $70 \times 70 \times 70$ mm without reinforcing bars for determining the strength, density and water absorption of concrete



Рис. 2. Общий вид арматурного стержня и его расположение в образце-призме с размерами $70 \times 70 \times 140$ мм

Fig. 2. General view of the reinforcing bar and its location in a sample prism with dimensions of $70 \times 70 \times 140$ mm

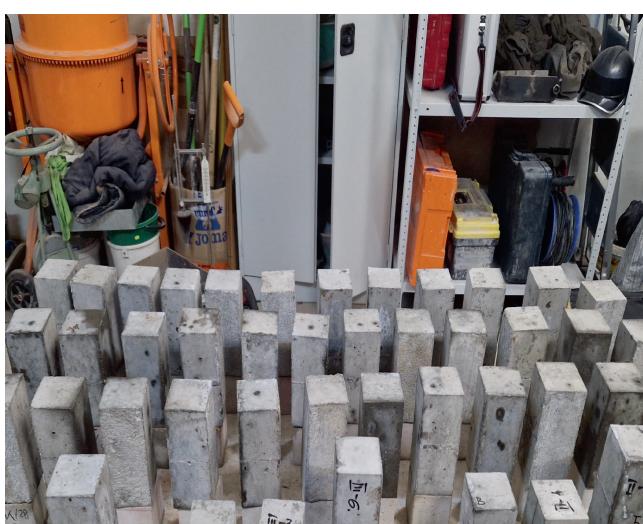


Рис. 3. Общий вид подготовленных для проведения исследований балок-призм с размерами $70 \times 70 \times 140$ мм

Fig. 3. General view of the prism beams prepared for research with dimensions of $70 \times 70 \times 140$ mm



Рис. 4. Общий вид арматуры и бетона образцов, возраст которых составляет около 70 лет, с карбонизированным (нейтрализованным) защитным слоем бетона

Fig. 4. General view of reinforcement and concrete samples, which are about 70 years old, with a carbonized (neutralized) protective layer of concrete



Рис. 5. Общий вид подготовленных для проведения исследований образцов бетона, возраст которых составляет около 70 лет, с карбонизированным защитным слоем бетона

Fig. 5. General view of concrete samples prepared for research, which are about 70 years old, with a carbonized protective layer of concrete

Мигрирующие ингибиторы коррозии стали на образцы наносили в полном соответствии с рекомендациями изготовителей и поставщиков.

Электрохимические испытания (для заформованных в лаборатории образцов) были проведены в исходном состоянии после пропаривания (для контрольных образцов), далее – после 30 и 90 суток хранения в камере нормального твердения. Для образцов с мигрирующими ингибиторами коррозии стали электрохимические испытания были проведены через 30 и 90 суток после их нанесения и хранения в камере нормального твердения.

Электрохимические испытания для образцов возрастом около 70 лет были проведены в исходном состоянии после изготовления, далее – после 30 суток хранения в камере нормального твердения. Для образцов с мигрирующими ингибиторами коррозии стали электрохимические испытания были проведены через 30 суток после их нанесения и хранения в камере нормального твердения.

Определение способности мигрирующих ингибиторов коррозии стали тормозить или полностью прекращать коррозию арматуры проводили ускоренными электрохимическими методами исследования в соответствии с ГОСТ 31383-2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний» [3]. Электрохимические методы испытаний основаны на оценке пассивирующего действия бетона по отношению к стальной арматуре и на получении зависимости плотности электрического тока от электрического потенциала стальной арматуры (потенциодинамический метод со снятием анодных поляризационных кривых – плотность тока-потенциал) и значения потенциала стальной арматуры в бетоне от плотности тока (гальванодинамический метод), на сравнении полученных результатов с установленными критическими значениями.

Коррозионное состояние стальной арматуры в бетоне оценивалось в соответствии с п. 8.5.4 ГОСТ 31383-2008 [3] по показателям, приведенным в табл. 1.

По проведенным электрохимическим исследованиям определялась:

– способность мигрирующих ингибиторов коррозии стали тормозить или полностью прекращать кор-

розию стальной арматуры, инициированную наличием в бетоне хлорид-ионов;

– способность мигрирующих ингибиторов коррозии стали тормозить или полностью прекращать коррозию арматуры, инициированную карбонизацией (со снижением pH < 11,8) защитного слоя бетона.

Результаты

Результаты определения прочности лабораторных образцов бетона приведены в табл. 2. Результаты определения плотности и водопоглощения лабораторных образцов бетона приведены в табл. 3 и 4.

Результаты определения коррозионного состояния стальной арматуры в лабораторных бетонных образцах с размерами 70 × 70 × 140 мм приведены в табл. 5. Результаты определения коррозионного состояния стальной арматуры в карбонизированных образцах бетона (возрастом около 70 лет) приведены в табл. 6.

Анодные поляризационные кривые стали в образцах бетона, заформованных в лабораторных условиях, приведены на рис. 6–12. Анодные поляризационные кривые стали в образцах бетона с возрастом около 70 лет (с карбонизированным защитным слоем) приведены на рис. 13–16.

Таблица 1

Table 1

Показатели коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне Indicators of the corrosion condition of steel reinforcement in concrete

Наименование показателей коррозионного состояния арматурной стали	Коррозионное состояние стальной арматуры
Потенциодинамический метод Плотность тока при потенциале +300 мВ: до 10 мА/см ² включительно от 10 до 25 мА/см ² включительно свыше 25 мА/см ²	пассивное состояние неустойчивое пассивное состояние интенсивная коррозия
Гальванодинамический метод Потенциал через (60 ± 5) с после отключения тока: более +5 мВ менее +5 мВ	пассивное состояние активное состояние, коррозия

Таблица 2

Table 2

Результаты определения прочности образцов бетона The results of determining the strength of concrete samples

№ п/п	Маркировка серии	Ширина сечения, мм	Длина сечения, мм	Высота образца, мм	Разрушающая нагрузка, P, кН	Прочность бетона, МПа	
						R_i	R_m
1	1П	70,7	70,7	70,7	190,5	32,4	33,3
2	2П	70,7	70,7	70,7	194,8	33,1	
3	3П	70,7	70,7	70,7	198,2	33,7	
4	4П	70,7	70,7	70,7	200,4	34,1	
5	5П	70,7	70,7	70,7	189,9	32,3	
6	6П	70,7	70,7	70,7	201,7	34,3	

Таблица 3
Table 3

Результаты определения плотности образцов бетона
The results of determining of the density of concrete samples

№ п/п	Размеры образцов, мм	Масса образца, г	Объем образца, см ³	Плотность образца, кг/м ³	Среднее значение плотности, кг/м ³
1	70 × 70 × 70	781	343	2277	2233
2	70 × 70 × 70	766	343	2233	
3	70 × 70 × 70	751	343	2190	

Таблица 4
Table 4

Результаты определения водопоглощения образцов бетона
Results of determination of water absorption of concrete samples

№ п/п	Размеры образцов, мм	Масса водонасыщенного образца, г	Масса высшенного образца, г	Водопоглощение образца, W_m , %	Водопоглощение среднее, W_m ср., %
1	70 × 70 × 70	725	696	4,1	4,3
2	70 × 70 × 70	718	688	4,4	
3	70 × 70 × 70	721	691	4,3	

Таблица 5
Table 5

Результаты определения коррозионного состояния стальной арматуры в лабораторных бетонных образцах
The results of determining of the corrosion state of steel reinforcement in laboratory concrete samples

№ п/п	Образцы бетона. Вид мигрирующих ингибиторов коррозии	Возраст образцов	Плотность тока при потенциале + 300 мВ, мкА/см ²	Потенциал через (60 ± 5) с после отключения тока, мВ	Коррозионное состояние стальной арматуры
1	Контрольные образцы без ингибиторов коррозии стали	исх. сост.	8,16–50,54	от -112 до +145	Неустойчиво пассивное и интенсивная коррозия.
		30 суток	10,2–13,3	от -86 до -96	Неустойчиво пассивное и интенсивная коррозия.
		90 суток	14,29–14,89	от -66 до -81	Интенсивная коррозия.
2	Образцы бетона с ингибитором коррозии стали Cortec MCI-2020	30 суток	8,3–10,7	от -16 до +129	Неустойчиво пассивное и интенсивная коррозия.
		90 суток	3,23–8,52	от +151 до +198	Пассивная
3	Образцы бетона с ингибитором коррозии стали ИФХАН-80	30 суток	7,3–10,6	от -114 до +144	Неустойчиво пассивное и интенсивная коррозия.
		90 суток	7,12–9,98	от +36 до +81	Пассивная
4	Образцы бетона с ингибитором коррозии стали Basf Master-Protect 8000 Cl	30 суток	6,5–17,7	от -283 до +10	Неустойчиво пассивное и интенсивная коррозия.
		90 суток	3,64–11,25	от -159 до +156	Неустойчиво пассивное и пассивная

Таблица 6
Table 6

Результаты определения коррозионного состояния стальной арматуры в карбонизированных образцах бетона (возрастом около 70 лет)

The results of determining of the corrosion state of steel reinforcement in carbonized concrete samples (about 70 years old)

№ п/п	Образцы бетона. Вид мигрирующих ингибиторов коррозии	Возраст образцов	Плотность тока при потенциале + 300 мВ, мкА/см ²	Потенциал через (60 ± 5) с после отключения тока, мВ	Коррозионное состояние стальной арматуры
1	Контрольные образцы без ингибиторов коррозии стали	исх. сост.	44,1–53,5	от -601 до -534	Интенсивная коррозия
2	Образцы бетона с ингибитором коррозии стали Cortec MCI-2020	30 суток	25,5–69,6	от -557 до -511	Интенсивная коррозия
3	Образцы бетона с ингибитором коррозии стали ИФХАН-80	30 суток	22,1–32,1	от -420 до -12	Интенсивная коррозия
4	Образцы бетона с ингибитором коррозии стали Basf Master-Protect 8000 Cl	30 суток	11,5–39,3	от -459 до -19	Интенсивная коррозия

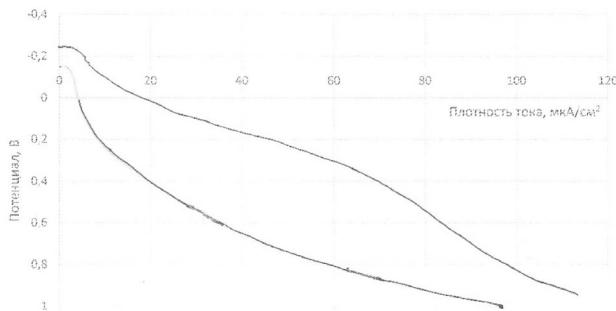


Рис. 6. Область анодных поляризационных кривых стали в образцах бетона, заформованных в лабораторных условиях, в исходном (после ТВО) состоянии и в возрасте 30 и 90 суток. Арматура находится в неустойчиво пассивном состоянии и в состоянии интенсивной коррозии

Fig. 6. The area of anodic polarization curves of steel in concrete samples molded in laboratory conditions, in the initial (after TVO) state and at the age of 30 and 90 days. The fittings are in an unstable passive state and in a state of intense corrosion

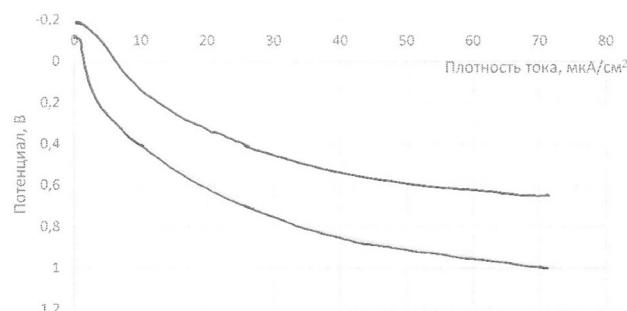


Рис. 9. Область анодных поляризационных кривых стали в образцах бетона, заформованных в лабораторных условиях, с ингибитором коррозии стали Basf Master-Protect 8000 CI в возрасте 30 суток. Арматура находится в неустойчиво пассивном состоянии и в состоянии интенсивной коррозии

Fig. 9. The area of anodic polarization curves of steel in concrete samples molded in laboratory conditions with a corrosion inhibitor of Basf Master-Protect 8000 CI steel at the age of 30 days. The reinforcement is in an unstable passive state and in a state of intense corrosion

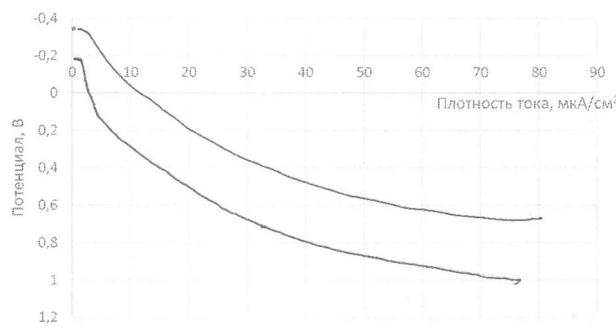


Рис. 7. Область анодных поляризационных кривых стали в образцах бетона, заформованных в лабораторных условиях, с ингибитором коррозии стали Cortec MCI-2020 в возрасте 30 суток. Арматура находится в неустойчиво пассивном состоянии и в состоянии интенсивной коррозии

Fig. 7. The area of anodic polarization curves of steel in concrete samples molded in laboratory conditions with a Cortec MCI-2020 steel corrosion inhibitor at the age of 30 days. The reinforcement is in an unstable passive state and in a state of intense corrosion

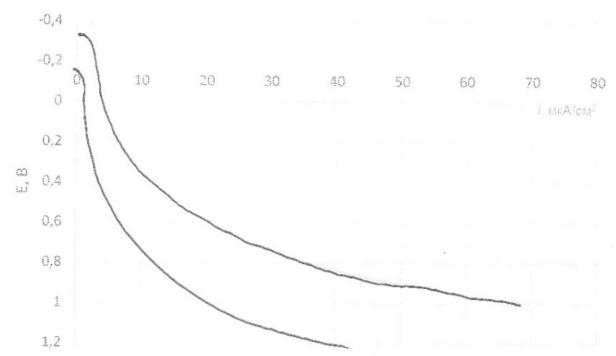


Рис. 10. Область анодных поляризационных кривых стали в образцах бетона, заформованных в лабораторных условиях, с ингибитором коррозии стали Cortec MCI-2020 в возрасте 90 суток. Арматура находится в пассивном состоянии

Fig. 10. The area of anodic polarization curves of steel in concrete samples molded in laboratory conditions with a Cortec MCI-2020 steel corrosion inhibitor at the age of 90 days. The reinforcement is in a passive state

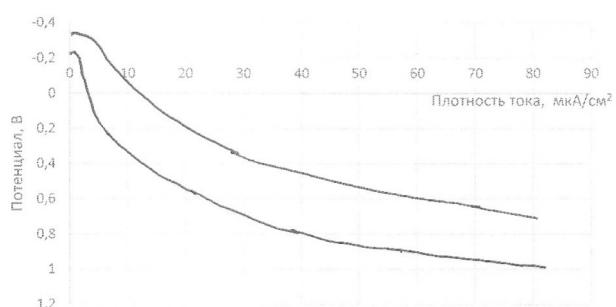


Рис. 8. Область анодных поляризационных кривых стали в образцах бетона, заформованных в лабораторных условиях, с ингибитором коррозии стали ИФХАН-80 в возрасте 30 суток. Арматура находится в неустойчиво пассивном состоянии и в состоянии интенсивной коррозии

Fig. 8. The area of anodic polarization curves of steel in concrete samples molded in laboratory conditions with IFKHAN-80 steel corrosion inhibitor at the age of 30 days. The reinforcement is in an unstable passive state and in a state of intense corrosion

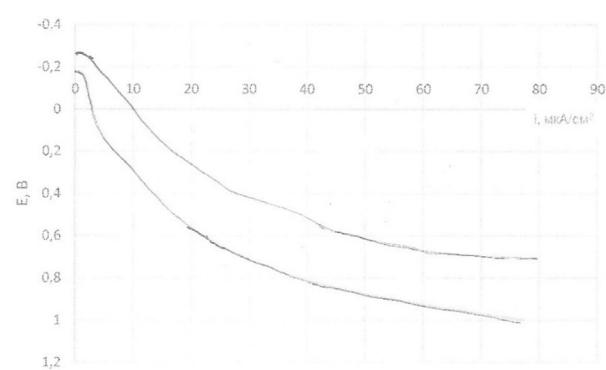


Рис. 11. Область анодных поляризационных кривых стали в образцах бетона, заформованных в лабораторных условиях, с ингибитором коррозии стали ИФХАН-80 в возрасте 90 суток. Арматура находится в пассивном состоянии

Fig. 11. The area of anodic polarization curves of steel in concrete samples molded in laboratory conditions with IFKHAN-80 steel corrosion inhibitor at the age of 90 days. The reinforcement is in a passive state

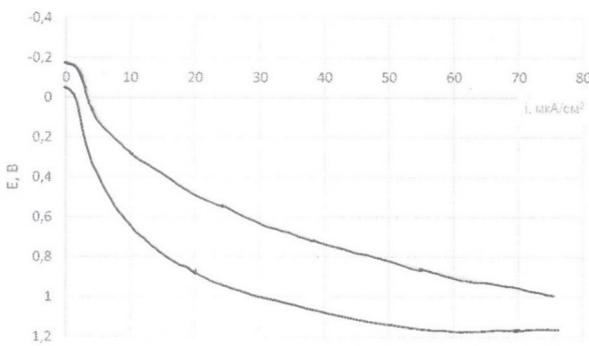


Рис. 12. Область анодных поляризационных кривых стали в образцах бетона, заформованных в лабораторных условиях, с ингибитором коррозии стали Basf Master-Protect 8000 CI в возрасте 30 суток. Арматура находится в неустойчиво пассивном состоянии и преимущественно в пассивном состоянии
Fig. 12. The area of anodic polarization curves of steel in concrete samples molded in laboratory conditions with a corrosion inhibitor of Basf Master-Protect 8000 CI steel at the age of 30 days. The reinforcement is in an unstable passive state and is predominantly in a passive state

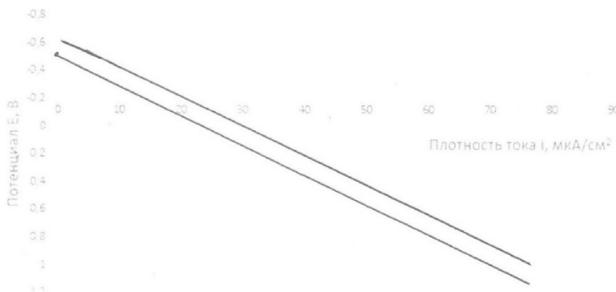


Рис. 13. Область анодных поляризационных кривых стали в карбонизированных образцах бетона (возрастом около 70 лет) без ингибиторов коррозии стали в исходном состоянии (сразу после изготовления) и возрасте 30 суток. Арматура находится в состоянии интенсивной коррозии
Fig. 13. The area of anodic polarization curves of steel in carbonized concrete samples (about 70 years old) without corrosion inhibitors of steel in its initial state (immediately after manufacture) and at the age of 30 days. The reinforcement is in a state of intense corrosion

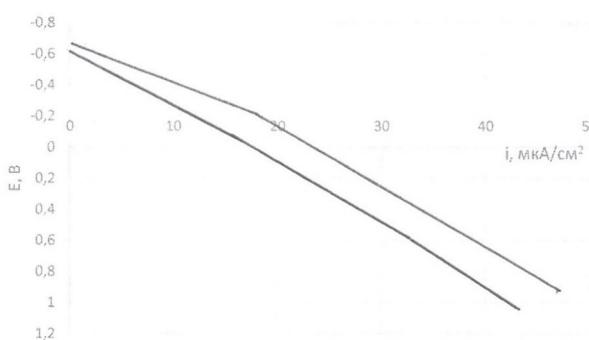


Рис. 14. Область анодных поляризационных кривых стали в карбонизированных образцах бетона (возрастом около 70 лет) с ингибитором коррозии стали Cortec MCI-2020 в возрасте 30 суток. Арматура находится в состоянии интенсивной коррозии
Fig. 14. The area of anodic polarization curves of steel in carbonized concrete samples (about 70 years old) with a Cortec MCI-2020 steel corrosion inhibitor at the age of 30 days. The reinforcement is in a state of intense corrosion

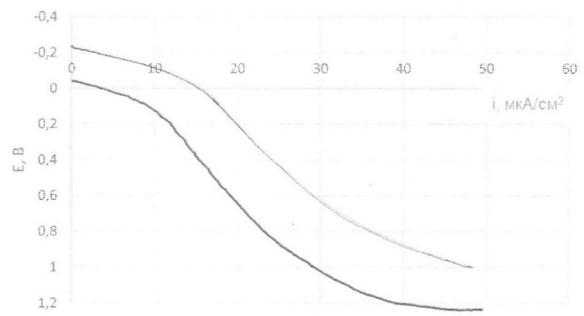


Рис. 15. Область анодных поляризационных кривых стали в карбонизированных образцах бетона (возрастом около 70 лет) с ингибитором коррозии стали ИФХАН-80 в возрасте 30 суток. Арматура находится в состоянии интенсивной коррозии
Fig. 15. The area of anodic polarization curves of steel in carbonized concrete samples (about 70 years old) with IFKHAN-80 steel corrosion inhibitor at the age of 30 days. The reinforcement is in a state of intense corrosion

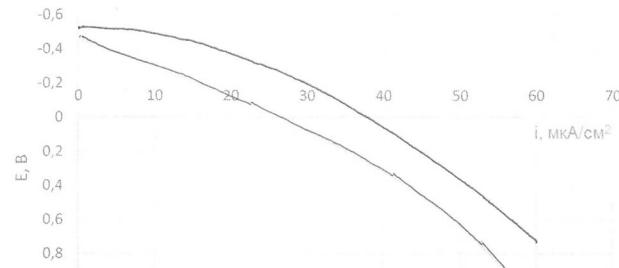


Рис. 16. Область анодных поляризационных кривых стали в карбонизированных образцах бетона (возрастом около 70 лет) с ингибитором коррозии стали Basf Master-Protect 8000 CI в возрасте 30 суток. Арматура находится в состоянии интенсивной коррозии
Fig. 16. The area of anodic polarization curves of steel in carbonized concrete samples (about 70 years old) with Basf Master-Protect 8000 CI steel corrosion inhibitor at the age of 30 days. The reinforcement is in a state of intense corrosion

Выводы

- Стальная арматура в контрольных образцах бетона (заформованных в лабораторных условиях) в исходном состоянии (после ТВО) находится в неустойчивом пассивном состоянии и в состоянии интенсивной коррозии. Стальная арматура в контрольных образцах бетона (заформованных в лабораторных условиях) в возрасте 30 и 90 суток находится в неустойчивом пассивном состоянии и в состоянии интенсивной коррозии.

- Стальная арматура в образцах бетона, обработанных Cortec MCI-2020 (заформованных в лабораторных условиях), в возрасте 30 суток находится в неустойчивом пассивном состоянии и в состоянии интенсивной коррозии. Стальная арматура в образцах бетона, обработанных Cortec MCI-2020 (заформованных в лабораторных условиях), в возрасте 90 суток находится в пассивном состоянии. Применение мигрирующего ингибитора коррозии стали Cortec MCI-2020 в возрасте 90 суток тормозит коррозию стали.

3. Стальная арматура в образцах бетона, обработанных ИФХАН-80 (заформованных в лабораторных условиях), в возрасте 30 суток находится в неустойчивом пассивном состоянии и в состоянии интенсивной коррозии. Стальная арматура в образцах бетона, обработанных ИФХАН-80 (заформованных в лабораторных условиях), в возрасте 90 суток находится в пассивном состоянии. Применение мигрирующего ингибитора коррозии стали ИФХАН-80 в возрасте 90 суток тормозит коррозию стали.

4. Стальная арматура в образцах бетона, обработанных Basf Master-Protect 8000 Cl (заформованных в лабораторных условиях), в возрасте 30 суток находится в неустойчивом пассивном состоянии и в состоянии интенсивной коррозии. Стальная арматура в образцах бетона, обработанных Basf Master-Protect 8000 Cl (заформованных в лабораторных условиях), в возрасте 90 суток находится неустойчивом пассивном и в пассивном состоянии. Применение мигрирующего ингибитора коррозии стали Basf Master-Protect 8000 Cl в возрасте 90 суток тормозит коррозию стали.

5. Стальная арматура в бетонных образцах с карбонизированным (нейтрализованным) защитным слоем бетона (образцы без обработки мигрирующими ингибиторами коррозии стали) находится в состоянии интенсивной коррозии. Стальная арматура в бетонных образцах с карбонизированным (нейтрализованным) защитным слоем бетона, обработанных мигрирующими ингибиторами коррозии Cortec MCI-2020, ИФХАН-80 и Basf Master-Protect 8000 Cl, в возрасте 30 суток находится в состоянии интенсивной коррозии. Применение мигрирующих ингибиторов коррозии стали Cortec MCI-2020, ИФХАН-80 и Basf Master-Protect 8000 Cl в возрасте 30 суток не тормозит коррозию стали.

Список литературы

1. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. Москва: Металлургия; 1969. 448 с.
2. Кузнецов Ю.И., Андреев Н.Н., Маршаков А.И. Физико-химические аспекты ингибирования коррозии металлов // Журнал физической химии. 2020. Т. 94. № 3. С. 381–392.
3. ГОСТ 31383-2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний. Москва: Стандартинформ; 2010.

References

1. Rosenfeld I.L. Corrosion and protection of metals. Moscow: Metallurgy; 1969. 448 p. (In Russian).
2. Kuznetsov Y.I., Andreev N.N., Marshakov A.I. Physicochemical aspects of metal corrosion inhibition. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2020, vol. 94, no. 3, pp. 505–515. (In Russian).
3. State Standard 31383-2008. Protection against corrosion of concrete and reinforced concrete constructions. Test methods. Moscow: Standartinform Publ.; 2010. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Замир Узиорович Беппаев✉, канд. техн. наук, заведующий лабораторией обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: beton61@mail.ru

Zamir U. Beppaev✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of the Survey and Ensure Durability of Concrete and Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: beton61@mail.ru

Лидия Хореновна Аствацатурова, старший научный сотрудник лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: beton61@mail.ru

Lidia H. Astvatsaturova, Senior Researcher of the Laboratory of the Survey and Ensure Durability of Concrete and Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: beton61@mail.ru

Сергей Алексеевич Колодяжный, научный сотрудник лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: beton61@mail.ru

Sergey A. Kolodyazhnyi, Researcher of the Laboratory of the Survey and Ensure Durability of Concrete and Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: beton61@mail.ru

Сергей Анатольевич Вернигора, младший научный сотрудник лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: nkv1956@yandex.ru

Sergey A. Vernigora, Junior Researcher of the Laboratory of the Survey and Ensure Durability of Concrete and Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: nkv1956@yandex.ru

Владислав Владимирович Лопатинский, инженер лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: labor9@mail.ru

Vladislav V. Lopatinskiy, Engineer of the Laboratory of the Survey and Ensure Durability of Concrete and Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: labor9@mail.ru

Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



АО «НИЦ «Строительство» –
это более чем 95-летний опыт
исследований и достижений в области
строительной науки

Мы – команда единомышленников,
способных реализовать сложнейшие
инженерные проекты

АО «НИЦ «Строительство» –
предлагает весь спектр инжиниринговых
услуг для строительного комплекса



Изыскания



Проектирование



Строительство



Эксплуатация



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

НИИСК
Илья Кунецко
НИИКБ
Илья Гвоздев
НИИСП
Илья Гершеванова



+7 (495) 602-00-70
info@cstroy.ru
www.cstroy.ru



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

НИИСК
Илья Кунецко
НИИКБ
Илья Гвоздев
НИИСП
Илья Гершеванова