

**Чикулаев Георгий Сергеевич**, магистр техн. наук, инженер, Белорусский национальный технический университет, г. Минск (Беларусь)

**Georgy Chikulaev**, Master of Engineering, engineer, Belarusian National Technical University, Minsk (Belarus)

## **ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ НА ЕЕ ФЕРРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА**

## **INFLUENCE OF ARMATURE CORROSION PRODUCTS ON ITS FERROMAGNETIC PROPERTIES**

### **АННОТАЦИЯ**

*В материале статьи представлены результаты экспериментальных исследований влияния состава продуктов коррозии стальной арматуры на показания прибора, позволяющего определить степень коррозионного состояния арматуры в железобетоне неразрушающим методом. Как известно, коррозия арматуры приводит к потере несущей способности конструкции и последующему разрушению ее, в связи с этим актуально определение коррозионного состояния арматуры эксплуатируемых зданий. В основе данного метода неразрушающего контроля коррозионного состояния арматуры железобетонных изделий и конструкций лежит тот факт, что в определенной области генерируемых частот ферромагнитные свойства самой стали и продуктов ее коррозии различаются. В связи с этим целью проведенных экспериментов было выявление зависимостей при использовании прибора, основанного на частотном разностно-ферромагнитном методе оценки коррозионного состояния арматуры. Были получены зависимости влияния таких продуктов коррозии как  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  на показания прибора в лабораторных условиях. Полученные результаты позволили выявить наибольшее влияние, оказываемое одним из продуктов коррозии, таким как  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , на прибор. Также было экспериментально рассмотрено влияние глубины проникновения ферромагнитных продуктов коррозии в защитный слой бетона*

на показания прибора. Так, с увеличением глубины проникновения ферромагнитных продуктов коррозии в защитный слой бетона на 10 мм, что эквивалентно, в первом приближении, проникновению ферромагнитных продуктов коррозии на это расстояние, показания прибора возрастают на 15–18 %. Данные эксперименты подтверждают перспективность использования прибора для определения коррозионного состояния арматуры в готовой конструкции основанного на частотном разностно-ферромагнитном методе оценки.

## ABSTRACT

*The material of the article contains results of pilot research of the influence of product structure of corrosion of steel armature and chemical structure on instrument readings to determine degree of a corrosion condition by a nondestructive method. As we know corrosion of reinforcement leads to the loss of bearing capacity of the construction and its subsequent destruction, in this regard, the relevant definition of corrosion condition of maintained buildings rebar is essential. The basis of this method of nondestructive corrosion monitoring of rebars in reinforced concrete products and structures is connected with the fact that in a certain region of frequencies generated by the ferromagnetic properties of the steel and its corrosion products are different. The purpose of the research was detection of dependences when using the device based on frequency a differential and ferromagnetic evaluation method of armature corrosion condition. It was obtained data according to the influence of such corrosion products like  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  on the readings in the laboratory. The results obtained allowed to identify the greatest impact of one of the corrosion products such as  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  on the device. There was also experimentally considered the influence of a penetration depth of ferromagnetic corrosion products to a protective layer of concrete on instrument readings. So, with the increase in a penetration depth of ferromagnetic corrosion products in a protective layer of concrete on 10 mm, which is equivalent, in first approximation, penetration of ferromagnetic corrosion products in this distance, instrument readings increase for 15–18 %. These experiments confirm prospects of using of the device for determination of the*

*corrosion condition of armature based on frequency differential and ferromagnetic evaluation method.*

**Ключевые слова:** коррозия арматуры, прибор, неразрушающий метод, толщина защитного слоя, ферромагнитные свойства.

**Keywords:** reinforcement corrosion, instrument, nondestructive method, the thickness of the protective layer, ferromagnetic properties.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Большинство зданий и сооружений из бетона и железобетона подвергаются агрессивным воздействиям внешней среды. Со временем при длительном воздействии агрессивной среды они разрушаются, что приводит к невозможности дальнейшей эксплуатации зданий и сооружений. Особенно интенсивно подвергаются разрушающим воздействиям агрессивной среды промышленные здания, которые могут подвергаться воздействиям продуктов и отходов производства. Разрушение конструкции вызывается коррозией материалов, применяемых в строительстве. Так, коррозия арматуры в железобетоне может привести к потере несущей способности конструкции. Это вызвано тем, что ржавчина занимает в 2–3 раза больший объем, чем прокорродировавшая сталь, и отличается рыхлостью [1,4]. Что приводит к росту трещин в защитном слое бетона и увеличению скорости разрушения конструкции.

Коррозионное разрушение арматуры может проявляться в виде сплошной (общей) коррозии, которая охватывает всю поверхность металла и бывает равномерной или неравномерной по глубине, или местной коррозии, поражающей лишь отдельные участки поверхности металла (пятна, язвы, коррозионные трещины). Наиболее опасна питтинговая коррозия, которая развивается вглубь арматуры, а не по поверхности [2, 5].

В связи с этим существует необходимость в оценивании состояния арматуры в эксплуатируемых конструкциях. На данный момент на кафедре «Технология бетона и строительные материалы» БНТУ разработан частотный разностно-ферромагнитный

метод оценки коррозионного состояния арматуры. Данный метод основан на том, что в определенной области генерируемых частот ферромагнитные свойства самой стали и продуктов ее коррозии различаются [3]. И этот факт позволяет установить зависимости ухода частоты от коррозионных потерь стали. В результате разрабатывается прибор «Измеритель степени коррозии арматуры» (ИСКА), который позволит вначале определить толщину защитного слоя бетона, а затем определить степень коррозии арматуры с достаточной точностью.

Точность оценки коррозионного состояния арматуры (степени ее поражения) данным прибором непосредственно зависит от ряда факторов, связанных с состоянием арматуры (наличие или отсутствие коррозии, разновидности образующихся продуктов коррозии и плотности коррозионных «новообразований») в бетоне, особенностями ее химического состава (содержанием в железе углерода и легирующих добавок, отражаемых маркой стали), различием в диаметре сечения арматурных элементов, а также толщины защитного слоя бетона конструкции.

### **ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ НА ФЕРРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНА**

Для выявления закономерностей влияния вещественного состава продуктов коррозии на их ферромагнитные свойства, с учетом некоторой неопределенности вещественного состава продуктов коррозии, образующихся в естественных условиях, проведен ряд испытаний. Изготавливались имитационные цементные образцы с различным количеством и соотношением специально введенного ферромагнитного наполнителя в виде порошков:  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

На основании данных обследований эксплуатируемых конструкций и опытно-экспериментальных исследовательских данных установлено, что концентрация продуктов коррозии в защитном слое бетона может достигать до  $0,5 \text{ г/см}^3$ , что явилось основанием для количественной дозировки ферромагнитного наполнителя в цемент.

Образцы представляли собой пластинки портландцементного камня размером 100 x 100 x 10 мм с ферромагнитным или кварцевым наполнителем (песок крупностью менее 0,315 мм). Смесь сухих материалов (цемент и наполнитель) предварительно гомогенизировали в лабораторной шаровой мельнице в течение 10 минут, затем затворяли водой, перемешивали и формовали на стандартной лабораторной виброплощадке. Образцы твердели трое суток в воде, а затем в пропарочной камере по режиму 3+6+3 ч при температуре изотермической выдержки 80 °С. Длительная 3-суточная выдержка до пропаривания понадобилась ввиду резкого замедления темпа твердения цемента в присутствии ферромагнитного наполнителя.

Параллельно для имитирования бетона были изготовлены также образцы-пластинки только с кварцевым наполнителем. Набором этих пластин можно было изменять толщину защитного слоя (ступенчато, через 10 мм) по отношению к исследуемому образцу с ферромагнитным наполнителем. Всего было изготовлено 17 партий образцов с различным соотношением наполнителей (таблица 1).

Таблица 1

**Состав образцов с различным соотношением наполнителя**

| №№<br>состава | Наполнитель, %                 |     |                     |       |
|---------------|--------------------------------|-----|---------------------|-------|
|               | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO | Fe(OH) <sub>2</sub> | Песок |
| 1             | 0                              | 0   | 100                 | 0     |
| 2             | 0                              | 0   | 67                  | 33    |
| 3             | 0                              | 0   | 33                  | 67    |
| 4             | 0                              | 100 | 0                   | 0     |
| 5             | 0                              | 67  | 0                   | 33    |
| 6             | 0                              | 33  | 0                   | 67    |
| 7             | 0                              | 33  | 67                  | 0     |
| 8             | 0                              | 67  | 33                  | 0     |
| 9             | 33                             | 0   | 67                  | 0     |
| 10            | 67                             | 0   | 33                  | 0     |
| 11            | 33                             | 67  | 0                   | 0     |

## Окончание таблицы 1

| №№<br>состава | Наполнитель, %                 |     |                     |       |
|---------------|--------------------------------|-----|---------------------|-------|
|               | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO | Fe(OH) <sub>2</sub> | Песок |
| 12            | 67                             | 33  | 0                   | 0     |
| 13            | 33                             | 33  | 33                  | 0     |
| 14            | 0                              | 33  | 33                  | 33    |
| 15            | 33                             | 0   | 33                  | 33    |
| 16            | 33                             | 33  | 0                   | 33    |
| 17            | 100                            | 0   | 0                   | 0     |

На диэлектрическое основание, выполненное из гетинакса, устанавливалась исследуемая пластинка (или пластинки) с наполнителем. Затем на нее последовательно устанавливали пластинки с кварцевым наполнителем для воссоздания толщины защитного слоя от 10 до 60 мм. После установки всех пластинок сверху прикладывался датчик прибора и снимались показания, полученные прибором. Для первых шести составов показания датчика снимались при толщине слоя с наполнителем 10 и 20 мм (таблица 2).

Таблица 2

**Ферромагнитные свойства бетонных образцов  
с различными наполнителями и толщиной защитного слоя**

| №№<br>состава | Толщина слоя<br>с наполнителем, мм | Толщина защитного слоя, мм |     |    |    |    |    |
|---------------|------------------------------------|----------------------------|-----|----|----|----|----|
|               |                                    | 10                         | 20  | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 1             | 10                                 | 124                        | 78  | 43 | 27 | 19 | 14 |
|               | 20                                 | 158                        | 99  | 60 | 35 | 24 | 19 |
| 2             | 10                                 | 82                         | 52  | 33 | 21 | 14 | 9  |
|               | 20                                 | 103                        | 64  | 38 | 25 | 18 | 12 |
| 3             | 10                                 | 63                         | 38  | 26 | 18 | 13 | 8  |
|               | 20                                 | 89                         | 55  | 36 | 24 | 17 | 12 |
| 4             | 10                                 | 126                        | 80  | 48 | 37 | 31 | 26 |
|               | 20                                 | 163                        | 110 | 75 | 52 | 38 | 32 |
| 5             | 10                                 | 103                        | 63  | 45 | 34 | 27 | 24 |
|               | 20                                 | 135                        | 85  | 57 | 41 | 35 | 31 |

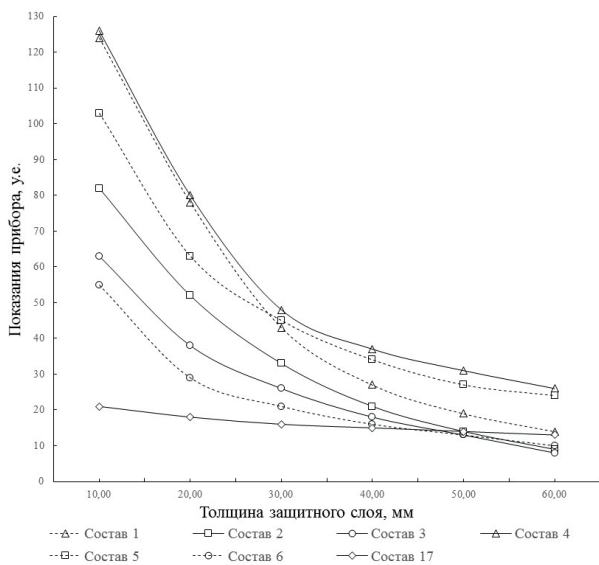
| №№<br>состава | Толщина слоя<br>с наполнителем, мм | Толщина защитного слоя, мм |    |    |    |    |    |
|---------------|------------------------------------|----------------------------|----|----|----|----|----|
|               |                                    | 10                         | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 6             | 10                                 | 55                         | 29 | 21 | 16 | 13 | 10 |
|               | 20                                 | 78                         | 45 | 28 | 21 | 18 | 17 |
| 7             | 10                                 | 117                        | 90 | 58 | 35 | 25 | 21 |
| 8             | 10                                 | 108                        | 80 | 48 | 21 | 23 | 19 |
| 9             | 10                                 | 100                        | 70 | 43 | 28 | 20 | 15 |
| 10            | 10                                 | 83                         | 58 | 37 | 24 | 18 | 14 |
| 11            | 10                                 | 62                         | 38 | 24 | 19 | 16 | 13 |
| 12            | 10                                 | 55                         | 33 | 21 | 17 | 14 | 12 |
| 13            | 10                                 | 105                        | 67 | 41 | 30 | 23 | 19 |
| 14            | 10                                 | 94                         | 64 | 38 | 27 | 21 | 18 |
| 15            | 10                                 | 68                         | 48 | 28 | 22 | 18 | 16 |
| 16            | 10                                 | 58                         | 32 | 22 | 18 | 16 | 14 |
| 17            | 10                                 | 21                         | 18 | 16 | 15 | 14 | 13 |

Сравнив и проанализировав полученные данные, можно установить влияние наполнителей на показания прибора и расположить их по степени убывания в следующем порядке:  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Как видно из полученных данных, наибольшее влияние на показания прибора оказывает  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  (рис. 1, 2, 3).

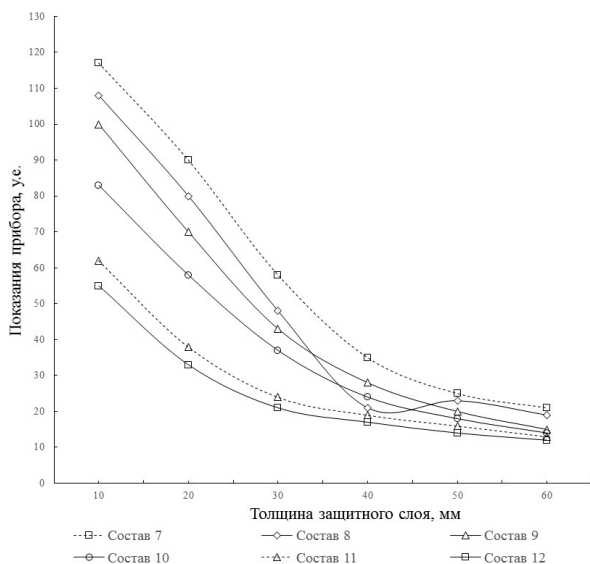
Одновременно на показания прибора оказывает влияние глубина проникновения ферромагнитных продуктов коррозии в защитный слой бетона. Так, с увеличением толщины образца с ферромагнитным наполнителем на 10 мм, что эквивалентно, в первом приближении, проникновению ферромагнитных продуктов коррозии на это расстояние, показания прибора возрастают на 15–18% (рис. 4).

В реальных условиях эксплуатации погрешность измерений будет, естественно, ниже вследствие неравномерной миграции в защитный слой ферромагнитных продуктов коррозии, что обусловлено неоднородностью бетона.

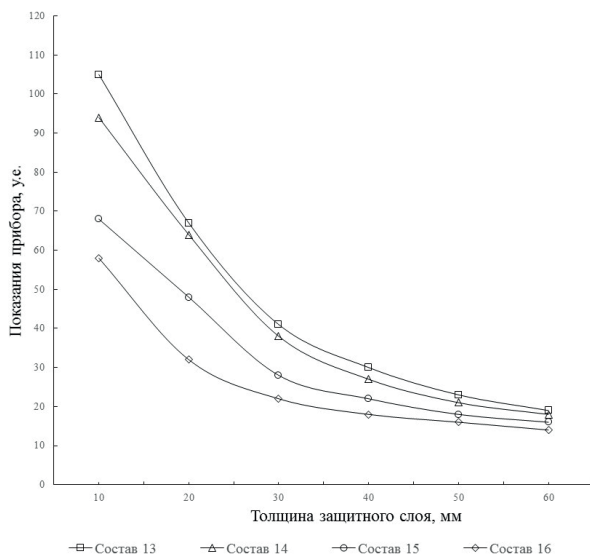
Исследование ферромагнитных свойств продуктов коррозии стальной арматуры в бетоне имеет исключительно большое значение при оценке степени коррозии, так как показания прибора находятся в прямой зависимости от количественного и качественного их состава.



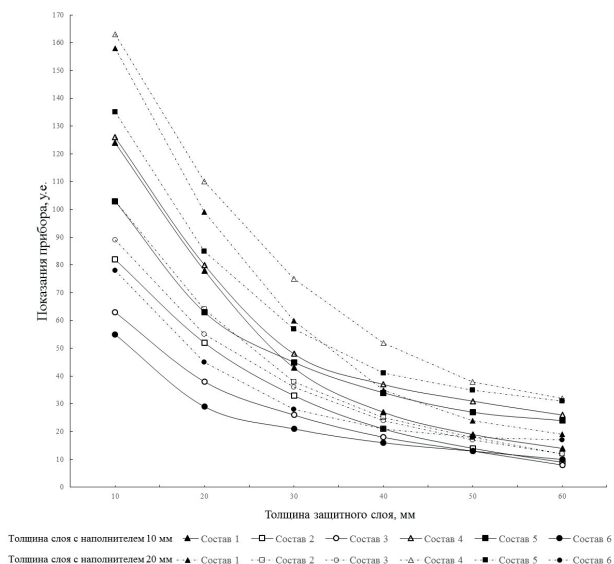
**Рисунок 1.** Влияние толщины защитного слоя и содержания продуктов коррозии стали на показания прибора (для одинарных плиток толщиной 10 мм)



**Рисунок 2.** Влияние толщины защитного слоя и содержания продуктов коррозии стали на показания прибора (для одинарных плиток толщиной 10 мм)



**Рисунок 3.** Влияние толщины защитного слоя и содержания продуктов коррозии стали на показания прибора (для одинарных плиток толщиной 10 мм)



**Рисунок 4.** Влияние глубины проникновения ферромагнитных продуктов коррозии в защитный слой бетона на показания прибора

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты выявили, что наибольшее влияние на показания прибора ИСКА оказывается таким продуктом коррозии как  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ . Два других продукта коррозии  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  также оказывают влияние на показания прибора, но в меньшей степени. Также экспериментально выявлено, что с увеличением толщины образца с ферромагнитным наполнителем на 10 мм, что эквивалентно, в первом приближении, проникновению ферромагнитных продуктов коррозии на это расстояние, показания прибора возрастают на 15–18 %.

Проведенные эксперименты по выявлению влияния продуктов коррозии стали, оказываемые на показания прибора ИСКА позволяют сделать вывод в перспективности использования прибора, основанного на частотном разностно-ферромагнитном методе оценки. Но необходимы дальнейшие проведения экспериментов для наработки большего массива данных, которые позволят выявить влияния других факторов. И учтя все эти факторы, можно определить коррозионное состояние арматуры на готовых и строящихся объектах, не нарушая целостности конструкций.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев, С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне / С.Н. Алексеев.–Москва: Стройиздат, 1968.– 233 с.
2. Алексеев, С.Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шисль.–Москва: Стройиздат, 1990.– 320 с.
3. Барташевич, А.А. Новый неразрушающий метод контроля степени коррозии стальной арматуры / А.А. Барташевич, Л.Я. Френкель, В.В. Бабицкий // Бетон и железобетон.–1974.– № 12.–С. 36–38.
4. Жарский, И.М. Коррозия и защита металлических конструкций и оборудования / И.М. Жарский, Н.П. Иванова, Д.В. Куис, Н.А. Свидуневич.–Минск: Вышэйшая школа, 2012.– 303 с.

5. Пухонто, Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений / Л.М. Пухонто.–Москва: Издательство АСВ, 2004.– 424 с.

## REFERENCES

1. Alekseev S.N. *Korroziya i zashchita armatury v betone* [Corrosion and protection of reinforcement in concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1968. 233 p. (rus)
2. Alekseev S.N., Ivanov F.M., Modry S., Shissl P. *Dolgovechnost zhelezobetona v agressivnykh sredakh* [Durability of concrete in aggressive environments]. Moscow: Stroyizdat, 1990. 320 p. (rus)
3. Bartashevich A.A., Frenkel L.YA., Babitskiy V.V. *Beton I zhelezobeton*. 1974. No 12. pp. 36–38. (rus)
4. Zharskiy I.M., Ivanova N.P., Kuis D.V., Svidunovich N.A. *Korroziya i zashchita metallicheskih konstruktsiy i oborudovaniya* [Corrosion and protection of metal structures and equipment]. Minsk: Vysheyshaya shkola, 2012. 303 p. (rus)
5. Puhonto, L.M. *Dolgovechnost zhelezobetonnykh konstruktsiy inzhenernykh sooruzheniy* [Durability of reinforced concrete structures engineering structures]. Moscow: Izdatelstvo ASV, 2004. 424 p. (rus)

*Статья поступила в редколлегию 21.11.2016.*