

**РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ
О МЕХАНИЗМЕ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИИ СТАЛИ,
В ТОМ ЧИСЛЕ АРМАТУРЫ**

**Плугин Д.А., к.т.н., доц., Плугин А.Н., д.х.н, проф.,
Конев А.В., аспирант, Плугин А.А., д.т.н, проф.**

*Украинская государственная академия железнодорожного
транспорта, г. Харьков*

Значительная часть ответственных железобетонных и металлических конструкций и сооружений на электрифицированных постоянным током участков железных дорог выходит из строя значительно раньше нормативных сроков службы, часто требует больших эксплуатационных расходов и безотлагательного капитального ремонта. Как показано нами [1, 2, 3], главной причиной недостаточной долговечности этих конструкций является несовершенство существующих теорий электрокоррозии железобетонных конструкций, а также стали, в том числе арматурной и рельсовой. Основной недостаток этих теорий заключается в их описательном характере, отсутствии конкретной оценки влияния напряжения на поверхности стали и рельсах на степень и кинетику электрокоррозии.

Настоящая статья направлена на разработку количественных представлений о механизме электрокоррозии стали и использования этих представлений для оценки кинетики ее электрокоррозии.

Из электростатики, потенциал и заряд взаимосвязаны выражениями

$$U = Q/R = (B/m); \quad Q = U \cdot R \quad (1)$$

Следовательно, единица потенциала (1 В) – это потенциал единичного заряда (1 Кл) на расстоянии 1 м от него. Единичный потенциал можно также связать с плотностью заряда на поверхности сферы единичного радиуса.

$$q = \frac{Q}{4\pi R^2} = \frac{U \cdot R}{4\pi R^2} = \frac{U}{4\pi R} \quad (2)$$

С учетом структуры стали, заряд при этом сосредоточен на поверхности зерен феррита этой сферы. Всего на поверхности сферы располагается следующее количество зерен феррита:

$$n_3 = \frac{4\pi R^2}{b^2} \quad (3)$$

Каждое зерно имеет площадь поверхности $s_3 = 6b_3^2$.

Следовательно, площадь, на которой распределится заряд Q , равна:

$$S_{Q,3} = s_{Q,3} \cdot n_{Q,3} = 6b_3^2 \cdot \frac{4\pi R^2}{b^2} = 24\pi R^2 \quad (4)$$

Однако в зерне заряд располагается на поверхности блока (рис. 1, 2). Количество этих блоков на поверхности зерна:

$$n_{Бл} = \frac{b_3^2}{b_{Бл}^2} \quad (5)$$

При площади поверхности одного блока $6b_{Бл}^2$, общая площадь поверхности блоков, приходящаяся на 1 зерно:

$$S_{Бл} = s_{Бл} \cdot n_{Бл} = 6b_{Бл}^2 \cdot \frac{b_3^2}{b_{Бл}^2} = 6b_3^2. \quad (6)$$

Т.е. полная поверхность, на которой оседают заряды, увеличивается еще в 6 раз и становится равной:

$$S_{Q,Бл} = 6S_Q = 6 \cdot 24\pi R^2 = 144 \cdot \pi R^2 \quad (7)$$

С учетом этого плотность поверхностного заряда на сфере радиусом $R = 1 \text{ м}$ составит:

$$q = \frac{Q}{144\pi R^2} = \frac{U \cdot R}{144\pi R^2} = \frac{U}{144\pi R} = \frac{U}{144\pi} \quad (8)$$

$$q_{СП}^{ПП} = \frac{Q}{144\pi R^2}. \quad (9)$$

Из электростатики $q = \frac{Q}{4\pi R^2}$, следовательно,

$$q_{ЭП}^{PP} = \frac{q}{24}; \quad q_{ен}^{PP} \cdot 4\pi R = \frac{q}{24} \cdot 4\pi R \quad (10)$$

С учетом (2)

$$q \cdot 4\pi R = U; \quad q_{ЭП}^{PP} \cdot 4\pi R = \frac{U}{24} \quad (11)$$

По аналогии с (11)

$$q_{ЭП}^{PP} \cdot 4\pi R = \psi_{ЭП}^{PP}, \quad \psi_{ЭП}^{PP} = \frac{U}{24} \quad (12)$$

Вместе с тем электроповерхностный потенциал связан с плотностью поверхностного заряда по формуле плоского ДЭС

$$q_{ЭП}^{PP} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\psi_{ЭП}^{PP}}{d_1} \quad (13)$$

При внешнем потенциале $U = 80 \text{ В}$:

$$\psi_{ЭП}^{PP} = \frac{80}{24} = 3,3 \text{ В}$$

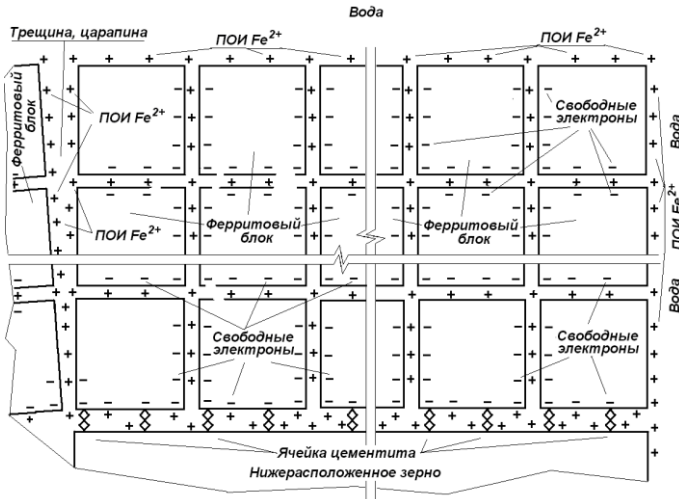


Рис. 1. Сечение поверхностного зерна с блоками в нем до наложения потенциала

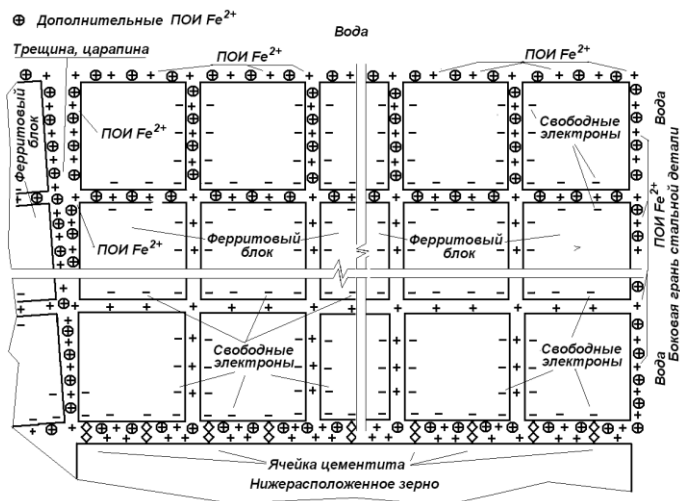


Рис. 2. Схема расположения дополнительных ПОИ Fe^{2+} поверхностного зерна с блоками в нем

Общий потенциал и плотность поверхностного заряда:

$$\psi_{ЭП}^{ПР} = 1,36 + 3,33 \approx 4,7 \text{ В}; \quad q = \frac{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,3}{2,52 \cdot 10^{-10}} \approx 0,116 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

С точки зрения электрокоррозии это очень высокие величины.

Подобным образом определены дополнительные и общие электроповерхностные потенциалы стали в зависимости от внешнего потенциала. Результаты в виде графиков представлены на рис. 3.

Определим расстояние между потенциалопределяющими ионами (ПОИ).

$$n_0^{ПР} = \frac{q}{ze} = \frac{0,116}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 0,036 \cdot 10^{17} = 0,36 \cdot 10^{18} \left(\frac{1}{\text{м}^2} \right)$$

$$a = \sqrt{\frac{1}{n_0^{ПР}}} = \sqrt{\frac{1}{0,36 \cdot 10^{18}}} = \sqrt{2,75 \cdot 10^{-18}} = 1,66 \cdot 10^{-9} = 16,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

Как видим, резко сокращается расстояние между ПОИ (без потенциала $25,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}$) за счет их увеличения, и, соответственно, значительное увеличение латерального электроповерхностного отталкивания между ПОИ, что вызовет сильную электрокоррозию стали.

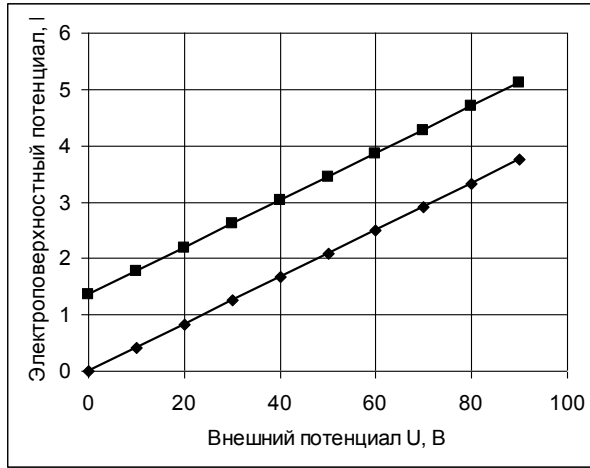


Рис. 3. Дополнительные (нижняя кривая) и общие (верхняя кривая) электроповерхностные потенциалы стали в зависимости от внешнего потенциала

Рассчитаем соответствующие силовые и кинетические характеристики электрокоррозии при внешнем потенциале $U = 80 \text{ В}$ ($a_0 = 16,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}$).

$$f_{\text{ЛЛГ}} = \frac{2^2 \cdot 2,56 \cdot 10^{-38} \cdot 700 \cdot 10^{-10}}{1,116 \cdot 10^{-10} \cdot 16,6^3 \cdot 10^{-30}} = \frac{7,17 \cdot 10^3 \cdot 10^{-48}}{5,104 \cdot 10^3 \cdot 10^{-40}} \approx 1,41 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$$

$$V = \frac{2 \cdot z^2 e^2 \cdot (r_{\text{Fe}^{2+}} + d_{\text{H}_2\text{O}})}{4\pi \epsilon_0 a_0^3 \cdot \eta \cdot b_B} = \frac{1,41 \cdot 10^{-8}}{6,92 \cdot 10^{-9}} = 2,03 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\tau_{\text{ПОИ}} = \frac{a_{\Gamma}}{2 \cdot V} = \frac{16,6 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot 2,03} \left(\frac{\text{м}}{\frac{\text{м}}{\text{с}}} \right) = 4,09 \cdot 10^{-10} (\text{с})$$

Количество атомов железа в 1 блоке феррита:

$$n_B = \frac{b^3}{d_{\text{Fe}}^3} = \left(\frac{7 \cdot 10^{-8}}{2,52 \cdot 10^{-10}} \right)^3 = 2,143 \cdot 10^9$$

Соответственно, время растворения 1 блока феррита:

$$\tau_B = \tau_{\text{ПОИ}} \cdot N = 4,09 \cdot 10^{-10} \cdot 2,143 \cdot 10^9 = 0,88 \text{ с}$$

Количество блоков феррита в 1 зерне, как определялось ранее, равно $1,86 \cdot 10^6$ шт. Время растворения 1 зерна феррита:

$$\tau_3 = \tau_B \cdot n_6 = 0,88 \cdot 1,86 \cdot 10^6 / 4 = 0,41 \cdot 10^6 \text{ с}$$

Количество зерен по глубине коррозии $h = 1 \text{ мм}$:

$$n_h = \frac{10^{-3}}{13 \cdot 10^{-6}} = 77$$

Время растворения стали на глубину 1 мм

$$\tau_{1\text{мм}} = 0,41 \cdot 10^6 \cdot 77 = 3,16 \cdot 10^7 \text{ с} = 1 \text{ год}$$

Это время соответствует равномерной коррозии. Однако, в железнодорожном пути ток утечки происходит над стальной подкладкой шириной 0,18 м. При эпюре шпал 1840 шт/км расстояние между ними составляет $1000/1840 = 0,54 \text{ м}$, а доля корродируемого участка $0,18/0,54 = 0,33$. В связи с этим электрокоррозия рельса на глубину 1 мм должна произойти за 0,33 года. За счет неоднородности намакания подошвы рельса - в отдельных местах еще быстрее.

С учетом среднего графика движения поездов 0,4 (4 поезда в час по 6 мин $24/60 = 0,4$) и доли времени 0,5, в течение которого поддерживается максимальная величина потенциала (эквивалентно потенциалу на рельсе в пути) глубина коррозии должна составить $20/0,44 = 45 \text{ сут}$ непрерывной обработки, фактическая коррозии подошвы рельса на глубину 1 мм должна произойти за 1,6 года:

$$\tau_{1\text{мм}} = 0,33/0,4/0,5 = 1,6 \text{ года}$$

Для непрерывного напряжения 80 В, что соответствует, например, длинным тонкостенные подземным трубопроводам, время коррозии на глубину 1 мм сократилось бы до $1 \cdot 0,4 \cdot 0,5 = 0,2$, и за год коррозия достигла бы $1/0,2 = 5 \text{ мм}$., что встречается в эксплуатации.

Скорость перемещения V ближайшего ПОИ на расстоянии $a_{\text{КГ}}$ выше в 35 раз ($2,03/0,0585 = 35$), по сравнению с обычной электрохимической коррозией. Следовательно, плотность тока составит около 0,78-35

$= 27 \text{ мА/дм}^2$, что намного превышает безопасную величину ($0,6 \text{ мА/дм}^2$).

Вывод

Таким образом, разработаны количественные представления о механизме коррозии стали, что позволяет использовать их для оценки степени и кинетики коррозии стальных конструкций.

Summary

The theoretical concepts of the mechanism electrocorrosion steel, including rebar and rail. Developed presentation built on the famous electrostatics relationship potential and charge, as well as data on the microstructure of steel and surface electrical properties of its structural elements - ferrite grains and blocks.

Литература

1. *Плугин А.Н.* Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: монография в 3 т. / [А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин и др.]. – К.: Наукова думка, 2013. – Т. 3: Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них. – 2013. – 288 с.

2. *Плугин А.А.* Теоретические предпосылки создания количественной теории электрокоррозии стали и защиты от нее / [А.А. Плугин, А.Н. Плугин, Ю.Н. Горбачова и др.]. // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2011. – Вип. 129. – С. 169 – 173.

3. *Плугин А.Н.* Механизм формирования структуры, прочности и долговечности стали и железобетона на основе электроповерхностного потенциала простых веществ / [А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Д.А. Плугин и др.]. // Науковий вісник ЛНАУ. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2010. – № 14. – С. 250 – 270.