УДК 629.197.6

Поступила в редакцию 12.05.2020
Received 12.05.2020

Л.Г. Сапун[1], В.Н. Дашков[1], А.В. Ващула[1,2], И.И. Хилько[1], А.В. Захаров[1]
[1]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: zaharov_av7@tut.by
[2]ГУ «Белорусская МИС»
п. Привольный, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь
belmis@mail.belpak.by

К ВОПРОСУ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ ОБОРУДОВАНИЯ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМ НА ОСНОВЕ СТЕКЛОЭМАЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

В статье приведён анализ способов защиты от коррозии оборудования животноводческих ферм. Для увеличения долговечности предложен способ нанесения стеклоэмалевых покрытий, определены технологические характеристики однослойного эмалевого покрытия.

Ключевые слова: коррозия, питтинг, кроющая способность, стеклоэмаль, толщина покрытия, прочность сцепления, ударная прочность, долговечность.

L.G. Sapun[1], V.N. Dashkov[1], A.V. Vashchula[1,2], I.I. Hilko[1], A.V. Zakharov[1]
[1]Educational Establishment «Belarusian State Agrarian Technical University»
Minsk, Republic of Belarus
e-mail: zaharov_av7@tut.by
[2]SI «Belarussian MTS»
Privolny, Minsk district, Minsk region, Republic of Belarus
belmis@mail.belpak.by

PROTECTION AGAINST CORROSION OF EQUIPMENT OF LIVESTOCK FARMS BASED ON GLASS-ENAMEL COATINGS

The article provides an analysis of methods of protection against corrosion of livestock farm equipment. In order to increase durability method of glass-enamel coating application is proposed, technological characteristics of single-layer enamel coating are determined.

Keywords: corrosion, pitting, coating ability, glass emal, coating thickness, adhesion strength, impact strength, durability.

Введение

Опыт эксплуатации животноводческих ферм показывает, что эксплуатационный ресурс оборудования хозяйств в настоящее время значительно меньше амортизационного срока и не превышает 4–5 лет. Согласно отечественным и зарубежным источникам, наибольшему коррозионному разрушению подвергаются системы холодного и горячего водоснабжения, микроклимата, стойловые ограждения, кормушки и поилки для животных. Атмосфера животноводческих ферм характеризуется присутствием в ней сероводорода, сернистого и углекислого газов, а также аммиака. При высокой относительной влажности на поверхности оборудования постоянно образуется слой конденсата, который взаимодействует с газовыми составляющими микроклимата. Вследствие окисления кислородом воздуха из сероводородной воды легко выделяется сера. При этом на поверхности металлической подложки протекает реакция:

$$2H_2S+H_2O+2O_2 \rightarrow H_2SO_3+S+2H_2O$$

с выделением серы и серной кислоты, которая способствует ускорению развития коррозионных процессов.

Присутствие в конденсате серной кислоты вызывает интенсификацию процессов коррозии чёрных и цветных металлов.

$$2SO_2+2H_2O+O_2 \rightarrow 2H_2SO_4$$

Подобными свойствами обладает и углекислый газ, присутствующий в атмосфере, который, взаимодействуя с раствором конденсата на металлической поверхности, образует угольную кислоту

$$CO_2+H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

Аммиак, обладая высокой растворимостью в воде, образует нашатырный спирт, который повышает щёлочность конденсата и этим самым снижает скорость коррозии металлов

$$NH_3+H_2O \rightarrow NH_4OH.$$

Для антикоррозионной защиты оборудования ферм применяются лакокрасочные покрытия (ЛКП) и в ряде случаев цинкование, но они не обеспечивают требуемой долговечности. После года эксплуатации на металлической поверхности разрушается до 65 % ЛКП. Стойкость оцинкованных деталей выше более чем в 3 раза и составляет в среднем 6–8 лет. Однако после 5 лет эксплуатации площадь коррозионного разрушения поверхности оцинкованных труб ограждений для содержания животных составляет не менее 20 %, а глубина коррозионного питтинга – 0,5–0,6 мм. Кроме того, цинк подвергается значительной коррозии в атмосфере сернистого газа, сероводорода и аммиака, содержащихся в микроклимате животноводческих ферм.

Повысить долговечность деталей оборудования животноводческих ферм можно за счёт применения для них антикоррозионной защиты стеклоэмалирования (далее – «эмалирования»). Этот вид покрытия отличается высокими противокоррозионными и сангигиеническими свойствами. Технологический процесс эмалирования стального проката состоит из этапов нанесения эмалевой массы шликера, сушки и обжига покрытия. Перед нанесением эмали проводится подготовка поверхности эмали к эмалированию, целью которой является очистка поверхности металла. Кроме того, подготовка поверхности служит для улучшения сцепления элементе с металлом; это осуществляется приданием стальной поверхности шероховатости. Адгезионная связь, возникающая в результате химического взаимодействия расплавленного силиката с металлом, значительно прочнее при эмалировании, чем при нанесении лакокрасочных или полимерных покрытий. Эмалированный стальной лист выдерживает нагрузку на растяжение до 100 МПа. Стеклоэмали по долговечности, твёрдости, устойчивости к физическим, химическим воздействиям превосходят битумные, лакокрасочные, полимерные покрытия; если битумная изоляция обеспечивает защиту труб в почве на протяжении 2–3 лет, то эксплуатация эмалированных труб обеспечивает долговечность в течение нескольких десятилетий [2].

Однако недостатком существующих эмалевых покрытий является низкая ударная прочность, а также высокая энергоёмкость технологического процесса. Эмалированию подвергается стальной прокат с содержанием углерода не более 0,10 %, что соответствует стали Ст.08КП. Основным конструктивным материалом при изготовлении деталей оборудования животноводческих ферм является сталь Ст. 3 с содержанием углерода 0,13…0,18 %.

Цель исследований – повышение долговечности деталей оборудования животноводческих ферм путём совершенствования технологии применения безгрунтовых эмалевых покрытий на стадии изготовления и при эксплуатации оборудования.

Основная часть

В задачу исследований входило определение оптимальной толщины эмалевого покрытия на основе безгрунтового эмалирования. Применялись четыре марки безгрунтовых эмалей, разработанных Институтом общей и неорганической химии НАНБ: 155Т, 47/149, 102/29 и 77Л. В ходе экспериментальных исследований прочности сцепления и ударной прочности покрытия, проводимых на установках, разработанных Новочеркасским политехническим институтом, применялось специальное приспособление согласно ГОСТ 24405-80. Сплошность эмалевых покрытий – по ГОСТ 27788-88. Результаты измерений обрабатывали методом математической статистики.

Установлено, что важнейшим технологическим фактором, влияющим на толщину эмалевого покрытия, является консистенция шликера. Основным оценочным показателем консистенции является кроющая способность, которая должна обеспечить следующие основные свойства покрытия: минимально допустимую толщину покрытия h, высокую равномерность $\Delta h \rightarrow 0$ и максимально допустимую скорость фиксации только что нанесённого слоя u (рис.1).

В связи с этим кроющую способность можно представить в виде функции

$$k = (h, \Delta, h, u), \quad (1)$$

Считаем, что неравномерность шликера стремится к 0, т.е. к максимальной равномерности, и скорость фиксации шликера есть величина постоянная.

В общем виде связь толщины слоя с исходными характеристиками материала можно установить с применением уравнения Дерягина-Леви (2) при нахождении пластинки с нанесённым шликером в вертикальном положении.

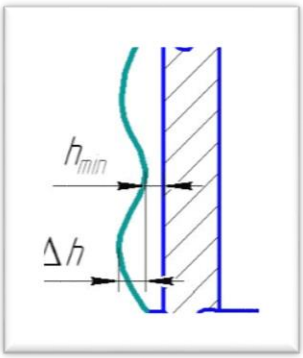

Рис. 1. Схема эмалевого покрытия

$$h = h_{\eta c} + h_{p0} = \frac{0,94...(V \cdot h_{\eta c})^{\frac{2}{3}}}{(\rho g)^{\frac{1}{2}\sigma^{\frac{1}{6}}}} + \frac{4,58...p_0{}^2}{(\rho g)^{\frac{3}{2}\sigma^{\frac{1}{2}}}}, \quad (2)$$

где

$h_{\eta c}$ – толщина слоя, обусловленная только вязкостью жидкости;

h_{p0} – толщина слоя, обусловленная только предельным напряжением сдвига;

V – скорость движения подложки;

σ – коэффициент поверхностного натяжения подложки.

Рассмотрим профиль слоя жидкости, оставшегося на стенке, наклонённой к горизонту под углом α через время t после начала опускания уровня жидкости (рис.2).

Поместим начало координат у верхней границы слоя жидкости, направив ось O_x вдоль пластинки вниз, а ось O_y перпендикулярно в сторону слоя. Допустим, что условие

$$\frac{dh}{dx} \ll 1, \quad (3)$$

Пренебрегая инерционными членами, при этом условии для любого участка слоя жидкости:

$$\frac{dh}{dx} - \rho g \sin\alpha = \eta \frac{d^2 v}{dy^2}, \quad (4)$$

где

p – давление,

ρ – плотность,

η – вязкость,

v – скорость частиц жидкости,

g – ускорение силы тяжести.

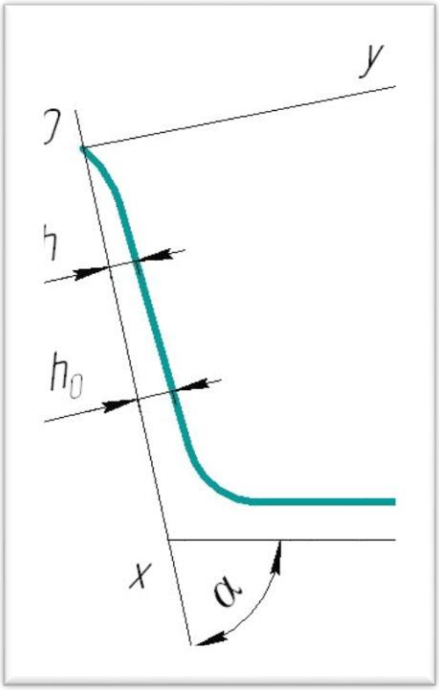

Рис. 2. Схема формирования слоя
на движущейся наклонной подложке

Граничные условия будут:

$$v \text{ при } y=0 \qquad (5)$$

$$\frac{dv}{dy}=0 \quad \text{при } y=h \qquad (6)$$

$$\frac{dp}{dx}=0 \quad \text{при } y=h \qquad (7)$$

Предполагая, что движение частиц жидкости не имеет компоненты нормальной к стенке, из условия (7) на свободной поверхности слоя жидкости получим, что и при любом y:

$$\frac{dp}{dx}=0, \qquad (8)$$

Из (4) и (8) следует уравнение

$$\frac{d^2v}{dy^2}=-\frac{\rho g\sin\alpha}{\eta}, \qquad (9)$$

Секундный объём жидкости, протекающий через поперечное сечение слоя толщиной h единичной ширины равен

$$D=\frac{\rho g\sin\alpha}{3\eta^3}h^3, \qquad (10)$$

Уравнение непрерывности можно, в нашем случае, учитывая (10), придать вид

$$\frac{dh}{dt}=-\frac{\rho g\sin\alpha}{\eta}h^2\frac{dh}{dx}=ch^2\frac{dh}{dx}, \qquad (11)$$

где

$$c=\frac{\rho g\sin\alpha}{\eta}$$

При интегрировании уравнения в частных производных (11) накладываются условия:

при $x=0$ и $t>0$, $h=0$ (12)

при $t=0$ и $x>0, h=\infty$ (13)

Уравнение, дающее в неявной форме решение, есть

$$x=f(h)+ch^2t \quad (14)$$

где

$f(h)$ – произвольная функция, или, учитывая (12) и (13), для $t>0$ имеем

$$x=ch^2t \quad (15)$$

Отсюда толщина слоя h_0 у «ватерлинии» равна:

$$h_0=\sqrt{\frac{V}{c}}=\sqrt{\frac{\eta V}{\rho g \sin\alpha}} \quad (16)$$

Основываясь на этом, покажем, что средняя толщина плёнки, т.е. её объём, выделенный на прикрываемую ею площадь, равна

$$h=\frac{2}{3}h_0=\frac{2}{3}\sqrt{\frac{\eta V}{\rho g \sin\alpha}} \quad (17)$$

Кроющая способность шликера равна:

$$K=\rho\cdot h \quad (18)$$

где

ρ – плотность шликера, кг/м^3.

Совмещая (17) и (18) находим кроющую способность шликера по исходным характеристикам материала:

$$K=\frac{2}{3}\sqrt{\frac{\rho\eta V}{g\sin\alpha}}\ ,\ \text{кг/м}^2 \quad (19)$$

где

η – вязкость, н/м·с^2;

g – ускорение силы тяжести, м/с^2.

Для формирования оптимальной толщины покрытия проведено исследование зависимости толщины покрытия и неравномерности толщины слоя от кроющей способности шликера (рис.3).

Из рис. 3 видно, что оптимальная толщина покрытия формируется при кроющей способности шликера, равной 0,45…0,56 кг/м^2, а график 2 показывает, что изменение неравномерности толщины слоя выражается кривой с оптимумом, находящейся в интервале 0,43±0,05 кг/м^2. Криволинейный характер зависимости (1) определяется физико-химическими процессами формирования эмалевого слоя. На участке оптимальной толщины она незначительно отличается от линейной зависимости (18).

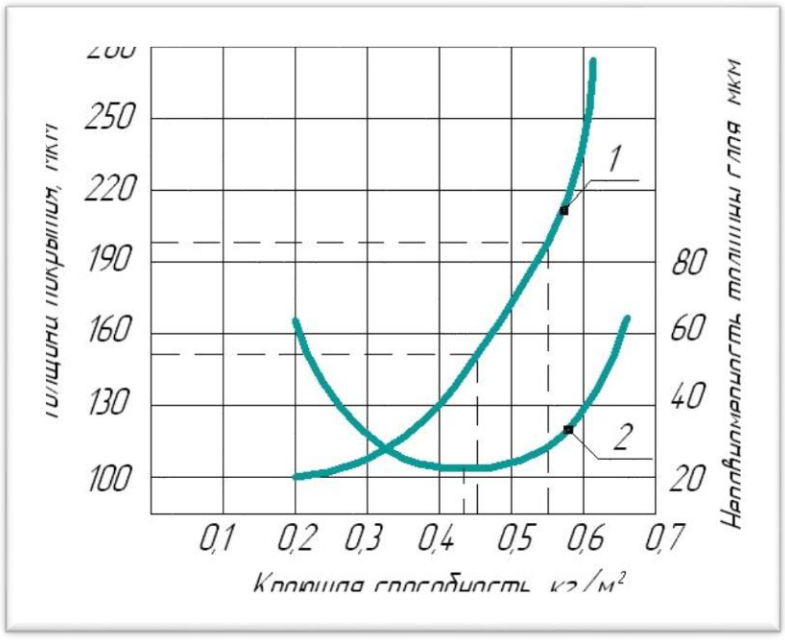

Рис. 3. Зависимость толщины покрытия (1) и неравномерности

толщины слоя (2) от кроющей способности шликера

Для выявления степени влияния значимости основных факторов на прочность сцепления эмалевого покрытия с подложкой использован метод теории планирования эксперимента. Исследуемыми факторами, влияющими на долговечность, являлись толщина покрытия и температура обжига эмалей. Уравнение регрессии, описывающее влияние исследуемых факторов:

$$y = 95,25 - 2,84x_1 + 1,83x_2 + 1,25x_1x_2 + 0,75x_1^2 - 0,25x_2^2 \quad (20)$$

где y – прочность сцепления, %; x_1 – толщина покрытия, мкм; x_2 – температура обжига, °С.

Из уравнения видно, что наибольшее влияние на прочность сцепления оказывает толщина покрытия. Притом, с уменьшением толщины прочность сцепления возрастает.

По результатам исследований составлена характеристика исследуемых марок безгрунтовых эмалей (табл.1).

Т а б л и ц а. 1. – **Характеристика безгрунтовых эмалей 155Т, 47/149, 102/29 и 77Л**

Показатели	**Ед-ца измерения**	**Марка эмали**			
		155Т	47/149	102/29	77Л
Температура обжига	°С	870-880	870-880	870-890	870-890
Толщина покрытия	мкм	150-200	150-210	150-210	150-215
Прочность сцепления	%	95-98	92-96	92-95	90-94
Прочность на удар (удельная энергия)	10^{-4}Дж/м^2	4,90	4,90	4,90	3,68
Коррозионная устойчивость:	мг/см^2	0,088	0,120	0,140	0,194
изменение массы					
Долговечность покрытия	лет	более 10,0	10,0	9,0	7,5

Анализ показывает, что из четырёх марок эмалей наиболее долговечным является покрытие на основе эмали 155Т и 47/149. Эмаль 155Т наносили на сборные элементы систем водоснабжения и стойлового оборудования ОСК-25А, автопоилок ПА-1Б, изготовленных из стали Ст.3. следует отметить стойкость эмали к царапинам и истиранию, устойчивость к низким температурам. Для эмалевого покрытия характерно, что защитный слой не набухает под воздействием коррозионно-агрессивных сред, а возможные очаги коррозии локализуются в местах нарушения слоя эмали. Повреждения постепенно закупориваются продуктами коррозии, доступ окислителя затрудняется, и процесс коррозии затормаживается. Испытания показали, что безгрунтовые эмали можно наносить на изделия животноводческих ферм, изготовленных из стали Ст.3. повышенное содержание углерода в стали Ст.3 не является препятствием для получения качественного покрытия.

Заключение

1. Установлено, что основным технологическим фактором, влияющим на толщину эмалевого покрытия, является консистенция шликера, главным оценочным показателем которой является кроющая способность.

2. На основании результатов сравнительных испытаний эмалей по основным показателям: потеря массы, прочность сцепления, ударная прочность, долговечность рекомендуется для защиты оборудования животноводческих ферм применять защитные покрытия на основе эмали 155Т и 47/149.

3. Определены оптимальные технологические характеристики нанесения однослойного эмалевого покрытия. Для рекомендуемых марок эмалей толщина покрытия должна составлять 150…200 мкм; температура обжига 870…880°С. Детали из стали Ст.3 предварительно подвергаются термическому отжигу.

Список использованной литературы

1. Сапун, Л.Г. Повышение долговечности деталей оборудования животноводческих ферм на основе применения стеклоэмалевых покрытий : автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.20.03 / Л.Г. Сапун. – ЦНИИМЭСХ, 1994. – 18 с.

2. Ляшенко, Б.А., Методы повышения прочности композиции сталь – коррозионностойкое эмалевое покрытие. / Б.А. Ляшенко, В.М. Мизонов, М.М. Кишнер. – Киев. : АНУССР, 1983. – 59 с.