

DOI: 10.32864/polymmattech-2021-7-2-59-65

УДК 667.6

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ КАК КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЦЕПТУР АНТИКОРРОЗИОННЫХ ЭПОКСИДНЫХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Н. ПОТАПЧИК<sup>+</sup>, А. Л. ЕГОРОВА

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь

*Цель работы — изучить влияние состава и количества пигментной части, состоящей из инертных пигментов и наполнителей, на физико-механические и электрохимические свойства лакокрасочных покрытий для создания эпоксидных антикоррозионных лакокрасочных материалов с высокими барьерными свойствами.*

*Для количественной характеристики барьерных свойств лакокрасочных покрытий в работе использованы величины потенциала разомкнутой цепи и емкостно-частотного коэффициента, рассчитываемого на основании значений емкости окрашенной стальной пластины при различных частотах переменного тока.*

*Проведен выбор методов исследования, позволяющих количественно оценить антикоррозионные свойства лакокрасочных покрытий. Исследовано влияние соотношения алюминиевой пудры, железной слюдки и микроталька в пигментной части лакокрасочного материала на физико-механические и защитные свойства лакокрасочных покрытий. Установлено, что увеличение доли алюминиевой пудры приводит к возрастанию прочности при ударе. Методами математического моделирования определено, что максимальные физико-механические и защитные свойства достигаются при содержании в пигментной части 39,7 об.% железной слюдки, 33,2 об.% алюминиевой пудры и 27,1 об.% микроталька.*

*Изучено влияние величины коэффициента лакокрасочной системы  $Q$  на свойства лакокрасочных покрытий. Установлены зависимости барьерных свойств покрытий, адгезии и прочности при ударе от величины коэффициента лакокрасочной системы.*

**Ключевые слова:** барьерные свойства лакокрасочных покрытий, потенциал разомкнутой цепи, емкость покрытий, емкостно-частотный коэффициент, адгезия, прочность при ударе.

## ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF COATINGS AS A CRITERION FOR OPTIMIZING FORMULATIONS OF ANTICORROSIVE EPOXY PAINTS

A. N. POTAPCHIK<sup>+</sup>, A. L. EGOROVA

Belarusian State Technological University, Sverdlov St., 13a, 220006, Minsk, Belarus

*The aim of the work was to study the effect of the composition and amount of the pigment part, which consists of inert pigments and fillers, on the physicochemical and electro-chemical properties of paint coatings for the creation of epoxy anticorrosive paints with high barrier properties. Methods for quantitatively evaluate the anticorrosive properties of coatings was chosen.*

*The barrier properties of paints were characterized by the values of the open circuit potential and the capacitance-frequency coefficient.*

\* Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: alexander.potapchik@mail.ru

*The influence of the ratio of aluminum powder, micaceous iron oxide and microtalc in the pigment part on the physicomechanical and protective properties was investigated. It was found that an increased amount of aluminum powder leads to an increase in impact resistance. By means of mathematical modeling it was determined that the maximum of physicomechanical and protective properties can be achieved when the pigment part consists of 39.7 vol.% micaceous iron oxide, 33.2 vol.% aluminum powder and 27.1 vol.% microtalc.*

*The effect of the PVC/CPVC ratio on barrier properties, adhesion and impact resistance of coatings was studied.*

**Keywords:** barrier properties of paints, open circuit potential, coating capacity, capacitance-frequency coefficient, adhesion, impact resistance.

## Введение

Лакокрасочные материалы на основе эпоксидных смол представляют собой одну из самых эффективных групп антикоррозионных материалов, широко применяемую в различных областях промышленности. Среди них весомую долю составляют продукты, содержащие инертные пигменты и наполнители, используемые для защиты металлических конструкций и изделий от воздействия различного вида коррозионно-активных сред. Развитие техники требует использования долговечных материалов, способных удовлетворить постоянно ужесточающиеся требования потребителей, поэтому создание новых материалов является актуальной задачей.

Важным этапом при разработке пигментированных лакокрасочных материалов является выбор состава и количества пигментной части, что оказывает значительное влияние на эксплуатационные свойства покрытий. Проведение исследований подобного рода является трудоемким процессом и часто сопровождается разработкой большого количества лакокрасочных композиций, формированием покрытий и изучением их свойств. Для эффективного решения данной задачи применяют методы математического планирования эксперимента, которые являются полезными инструментами при создании лакокрасочных материалов с заданными эксплуатационными свойствами, позволяющими значительно снизить трудо- и материалоемкость поисковых исследований за счет разработки моделей, описывающих взаимосвязь между свойствами лакокрасочного покрытия и составом пигментной части [1]. Так как лакокрасочный материал может быть представлен смесью, состоящей из пленкообразующего вещества, пигментов и наполнителей, функциональных добавок, то планирование эксперимента может быть реализовано на диаграммах состав–свойство.

Однако, планы эксперимента по совместному изучению влияния количества пигментной части и ее качественного состава весьма громоздки и требуют проведения большого числа опытов. Целесообразным является раздельное изучение указанных факторов: на первом этапе проводится оптимизация состава пигментной части при фиксированном ее содержании в лакокрасочном материале, в этом случае регулируемым параметром служит объемное соотношение компонентов пигментной части, а крите-

рием оптимизации — численное выражение свойства покрытия, характеризующее его защитное действие. На втором этапе определяется количество пигментной части, при котором достигаются лучшие свойства у сформированных покрытий.

Известно, что защитное действие лакокрасочных покрытий основано на их способности тормозить электрохимические реакции на поверхности металла (в большей степени анодную реакцию ионизации металла), замедлять диффузию и перенос коррозионно-активных агентов, а также на адгезионном взаимодействии с субстратом [2, 3]. Поэтому при создании высокоэффективных антикоррозионных лакокрасочных материалов желательно использовать методы, позволяющие получить количественную характеристику свойств покрытий, непосредственно оценивающие их защитные функции. С этой целью наибольшее развитие и распространение получили электрохимические методы исследования [4, 5]. Способность покрытий тормозить электрохимические реакции может быть оценена по изменению потенциала разомкнутой цепи окрашенного металлического электрода [5, 6]. Электрохимическая импедансная спектроскопия, являясь современным методом оценки противокоррозионной эффективности лакокрасочных покрытий, дает возможность изучить характер зависимости сопротивления и емкости окрашенных стальных пластин от частоты переменного тока, что позволяет изучить защитные свойства лакокрасочных покрытий [7, 8]. Адгезионное взаимодействие покрытия с субстратом может быть оценено по значению силы, необходимой для механического отделения лакокрасочной пленки от окрашенной поверхности.

**Цель работы** — изучить влияние состава и количества пигментной части, состоящей из инертных пигментов и наполнителей, на физико-механические и электрохимические свойства лакокрасочных покрытий для создания эпоксидных антикоррозионных лакокрасочных материалов с улучшенными барьерными свойствами.

## Материалы и методы исследования

Исследования проводили на пленкообразующей системе, состоящей из эпоксидной смолы *KER 215* («Kumho P&B Chemicals», Республика Корея) с содержанием эпоксидных групп 4,88 ммоль/г и аминного отвердителя *KCA-4303* («Kumho P&B Chemicals», Республика Корея) с содержанием амин-

ных групп 5,22 ммоль/г.

В качестве инертных пигментов и наполнителей с пластинчатой формой частиц использовали алюминиевую пудру ПАП-1 (ПАО «КУЗОЦМ», Россия), железную слюдку *MIOX micro 30* («Kärntner Montanindustrie», Австрия) и микротальк *Finntalc M30* («Mondo Minerals», Финляндия), некоторые свойства которых представлены в табл. 1.

Маслоемкость пигментов и наполнителей определяли согласно ГОСТ 21119.8 «Общие методы испытаний пигментов и наполнителей. Определение маслоемкости».

Диспергирование пигментной части в эпоксидной смоле проводили с помощью лабораторного дисольвера «Dispermat C40» («VMA-GETZMANN», Германия) при частоте вращения вала 3000 об/мин в течение 60 мин до степени перетира не более 60 мкм.

Покрытия для испытаний толщиной  $220 \pm 20$  мкм формировали с помощью щелевого аппликатора на механически очищенных с помощью абразивной шкурки и обезжиренных металлических пластинах из стали марки 08 кп с размерами  $70 \times 150 \times 0,8$  мм согласно ГОСТ 9.402 «ЕСЗКС. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию» на стеклянных пластинах с размерами  $90 \times 120 \times 1,2$  мм, подготовленных согласно ГОСТ 8832 «Материалы лакокрасочные. Методы получения лакокрасочного покрытия для испытаний». Перед испытанием окрашенные пластины выдерживали при комнатной температуре в течение 7 сут.

Адгезию покрытий определяли методом отрыва согласно ГОСТ 32299 «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва», прочность при ударе — ГОСТ 4765 «Материалы лакокрасочные. Метод определения прочности при ударе».

Емкость окрашенных стальных пластин измеряли в соответствии с *I-V* методом [9] в диапазоне частот переменного тока  $F$  500–3200000 Гц после 90 сут воздействия 3% водного раствора NaCl. Измеренные значения емкости использовали для расчета емкостно-частотных коэффициентов  $K_{F,C}$ , величина которых может служить мерой уровня защитных свойств лакокрасочного покрытия:

$$K_{F,C} = \bar{C} \cdot \left( \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{C_{\min}} \right) / N,$$

где  $\bar{C}$ , Ф — средневзвешенная величина емкости окрашенной стальной пластины в выбранном частотном диапазоне;  $N$  — количество измерений в выбранном частотном диапазоне;  $C_i$ , Ф — значение емкости окрашенной стальной пластины при

частоте переменного тока  $F$ , входящей в выбранный частотный диапазон;  $C_{\min}$ , Ф — минимальное значение емкости окрашенной стальной пластины, наблюдаемое в выбранном частотном диапазоне.

Потенциал разомкнутой цепи  $V_{pc}$  определяли с помощью потенциостата-гальваностата «Р-2Х» («Electrochemical Instruments», Россия) относительно хлоридсеребряного электрода сравнения после 90 сут воздействия 3% водного раствора NaCl.

Составление плана эксперимента и дальнейшую статистическую обработку полученных данных приводили в программе *Statgraphics Centurion 18*.

### Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследований изучили влияние состава пигментной части эпоксидного лакокрасочного материала на физико-механические и защитные свойства сформированных покрытий.

Значение коэффициента лакокрасочной системы  $Q$ , равного отношению объемной концентрации пигментной части (ОКП) к критической объемной концентрации пигментной части (КОКП), для всех составов зафиксировали на уровне 0,7. Данное значение выбрали из практического опыта, как максимально близкое к 1, при котором соблюдается постоянство технологии диспергирования (хорошее смачивание, требуемая вязкость) для всех составов без добавления растворителей.

В работе [10] показано, что значения КОКП в эпоксидной смоле с приемлемой точностью можно определить расчетным методом на основании значений маслоемкостей пигментных частей по формуле:

$$КОКП = \frac{100\%}{1 + \frac{\rho_{п.ч.}}{\rho_{\text{льнян.масла}}} \cdot \frac{M}{100}},$$

где  $M$ , г/100 г — маслоемкость;  $\rho_{п.ч.}$ , г/см<sup>3</sup> — плотность пигментной части;  $\rho_{\text{льнян.масла}}$  — плотность льняного масла, равная 0,935 г/см<sup>3</sup>.

Благодаря предварительным испытаниям на используемой пленкообразующей системе определили, что максимальное объемное содержание микроталька *Finntalc M30* в пигментной части не должно превышать 50 об.%. В противном случае физико-механические свойства покрытий значительно снижаются. Для учета существующих ограничений по содержанию микроталька и равномерного покрытия исследуемой области на диаграмме состав-свойство разработали симплекс-решетчатый план эксперимента для трехкомпонентной смеси алюминиевая пудра–железная слюдка–микротальк.

Таблица 1 — Свойства используемых пигментов и наполнителей  
Table 1 — Properties of the pigments and the fillers

Компонент пигментной части	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Маслоемкость, г/100 г	Цвет
алюминиевая пудра (ПАП-1)	2,55	81,03	черный металл
железная слюдка ( <i>MIOX micro 30</i> )	4,80	15,04	серый металл
микротальк ( <i>Finntalc M30</i> )	2,75	48,98	белый

На рис. 1 изображена симплексная решетка с нанесенными точками, координаты которых соответствуют объемной доле компонентов в пигментной части.

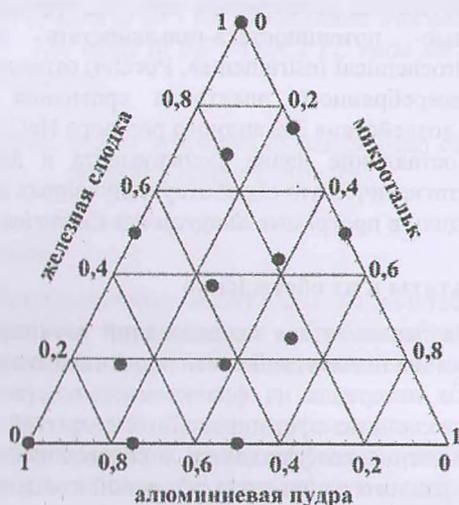


Рисунок 1 — Графическое изображение плана эксперимента  
Fig. 1 — Graphical representation of the experimental design

План эксперимента предполагает изучение свойств эпоксидных покрытий, сформированных из 13 составов, различающихся количественным соотношением компонентов в пигментной части. В табл. 2 приведена характеристика исследуемых составов пигментных частей, необходимая для составления рецептур лакокрасочных материалов.

На основании данных табл. 2 рассчитали необходимые количества пигментов, наполнителей, эпоксидной смолы и отвердителя (табл. 3). При расчетах использовали ранее экспериментально установленное оптимальное массовое соотношение эпоксидной смолы и отвердителя, равное 1,57 : 1.

После изготовления составов и формирования покрытий провели измерение их физико-механических и электрохимических свойств с

последующей математической обработкой для построения диаграмм состав-свойство. На рис. 2 представлены зависимости емкостно-частотного коэффициента  $K_{FC}$ , потенциала разомкнутой цепи  $V_{pc}$ , адгезии, прочности при ударе покрытий от состава пигментной части.

Из рис. 2 видно, что прочность при ударе возрастает с увеличением доли алюминиевой пудры, т. е. уменьшением доли железной слюдки в составе пигментной части. Зависимость других свойств покрытий от состава пигментной части имеет более сложный характер. Визуальный анализ диаграмм показывает, что получение покрытий, имеющих высокие защитные и физико-механические свойства, возможно при содержании в пигментной части железной слюдки в количестве 30–70 об.%, алюминиевой пудры — 20–65 об.%, микроталька — 22–44 об.%. Для определения точных значений содержания компонентов в пигментной части, при котором сформированные покрытия имеют лучшие защитные свойства, решили задачу оптимизации с использованием функционала программы *Statgraphics Centurion 18*. При решении задачи оптимизации учитывали значимость каждого показателя с позиции максимизации барьерных свойств покрытий, основываясь на нижеследующем:

1) эпоксидные антикоррозионные лакокрасочные материалы барьерного типа действия в большей степени должны препятствовать проникновению коррозионно-активных агентов к металлической поверхности, что в данной работе оценивали величиной коэффициента  $K_{FC}$ ;

2) покрытия должны иметь большую адгезию к окрашиваемой поверхности, т. к. адгезионные силы препятствуют росту коррозионной фазы на границе металл-полимерное покрытие;

3) величина потенциала разомкнутой цепи  $V_{pc}$  является мерой термодинамической устойчивости металла к коррозионному разрушению. Иными

Таблица 2 — Характеристика исследуемых лакокрасочных составов  
Table 2 — Characteristics of the investigated compositions

№ состава	Содержание компонента в пигментной части, об.%			Плотность, г/см <sup>3</sup>	Маслоемкость, г/100г	КОКП, об.%	ОКП при $\varnothing = 0,7$ , об.%
	железная слюдка	алюминиевая пудра	микроталька				
1	100,0	—	—	4,800	15,04	58,07	40,65
2	—	100,0	—	2,550	81,03	31,15	21,81
3	50,0	—	50,0	3,775	41,14	37,58	26,31
4	—	50,0	50,0	2,650	69,91	33,54	23,48
5	68,7	18,8	12,5	4,122	24,65	47,92	33,54
6	18,8	68,7	12,5	2,997	61,06	33,82	23,67
7	43,7	18,8	37,5	3,609	37,48	40,87	28,61
8	18,8	43,7	37,5	3,047	54,88	35,86	25,10
9	50,0	50,0	—	3,675	44,40	36,43	25,50
10	75,0	—	25,0	4,288	19,74	52,49	36,74
11	—	75,0	25,0	2,600	78,16	31,51	22,06
12	25,0	25,0	50,0	3,213	49,78	36,90	25,83
13	37,5	37,5	25,0	3,444	41,52	39,53	27,67

Таблица 3 — Рецептуры исследуемых составов  
Table 3 — Formulations of the investigated compositions

№ состава	Масса компонента, г				
	эпоксидная смола	отвердитель	железная слюдка	алюминиевая пудра	микротальк
1	40,37	25,64	191,95	—	—
2	52,61	33,41	—	55,62	—
3	49,58	31,48	63,14	—	36,18
4	51,48	32,69	—	29,94	32,29
5	44,72	28,40	110,68	16,04	11,53
6	51,35	32,61	21,30	41,50	8,14
7	48,03	30,50	60,08	13,68	29,50
8	50,39	32,00	22,59	28,00	25,88
9	50,12	31,83	61,20	32,51	—
10	42,56	27,03	132,26	—	25,26
11	52,43	33,30	—	42,19	15,17
12	49,90	31,69	31,00	16,47	35,52
13	48,66	30,90	49,81	26,46	19,02

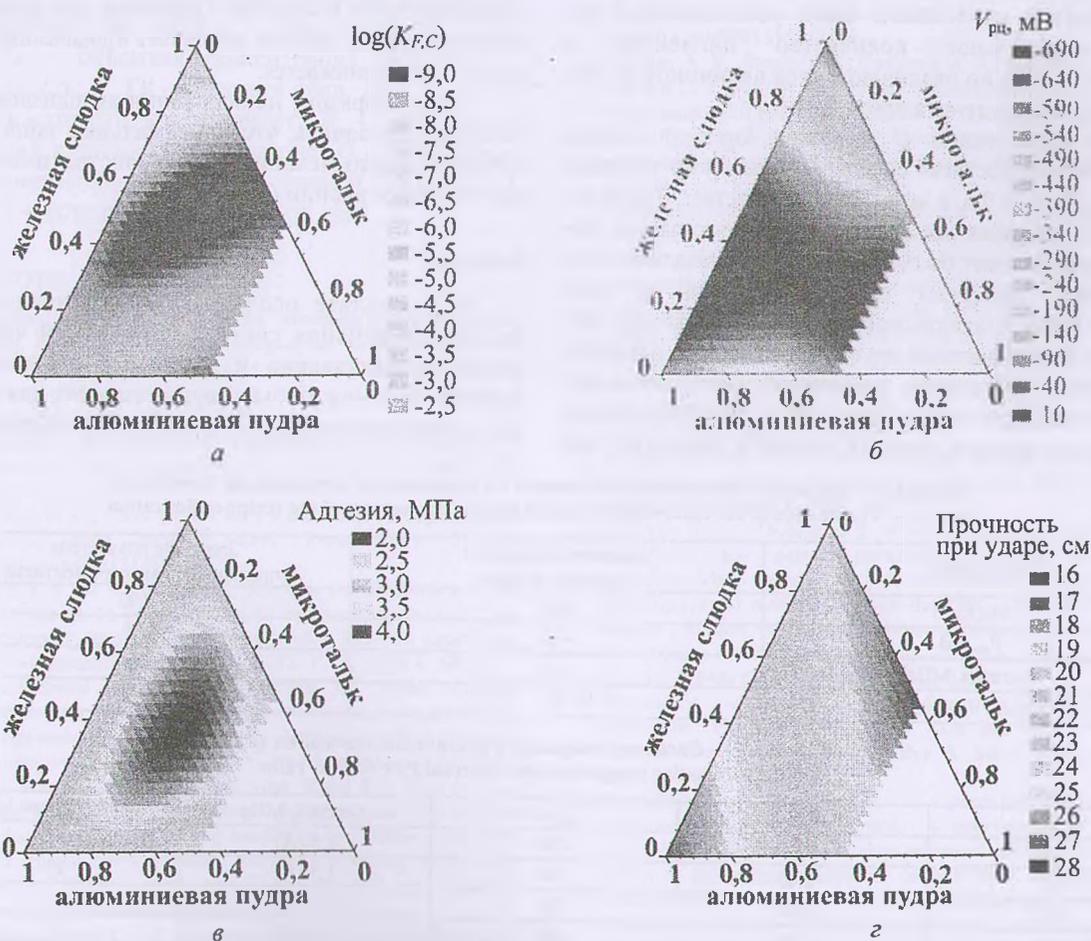


Рисунок 2 — Зависимость  $\log(K_{FC})$  (а),  $V_{pit}$  (б), адгезии (в), прочности при ударе (г) покрытий от состава пигментной части эпоксидного лакокрасочного материала

Fig. 2 — Dependencies of  $\log(K_{FC})$  (а),  $V_{pit}$  (б), adhesion (в), impact resistance (г) on the composition of the pigment part of the epoxy paint

словами, смещение потенциала металла в более электроположительную область свидетельствует о затруднении протекания коррозионных процессов. Так как смещение потенциала стального электрода в более электроположительную область происходит даже при нанесении на него непигментированной

полимерной пленки, то данный показатель имеет меньшую значимость;

4) значение прочности при ударе существенно не соотносится с барьерными свойствами покрытия.

В результате решения задачи оптимизации найдено оптимальное содержание компонентов

пигментной части, которое составляет 39,7 об.% для железной слюдки, 33,2 об.% для алюминиевой пудры и 27,1 об.% для микроталька. С целью экспериментальной проверки математических моделей, описывающих связь между составом пигментной части и величинами исследуемых свойств покрытий, а также правильности проведенной процедуры оптимизации разработали состав с указанной пигментной частью и определили свойства покрытий на его основе (табл. 4). Из табл. 4 видно, что ожидаемые и экспериментально определенные характеристики покрытия различаются незначительно, что свидетельствует о достаточной точности полученных моделей.

На втором этапе исследований изучали влияния величины коэффициента лакокрасочной системы  $Q$  на свойства лакокрасочных покрытий с последующим определением такого его значения, при котором сформированные покрытия обладают лучшими физико-механическими и антикоррозионными свойствами. Исследовали 10 составов, содержащих в пигментной части установленное ранее оптимальное количество пигментов и наполнителей, но различающихся величиной  $Q$ . Результаты приведены в табл. 5.

С возрастанием  $Q$  величина  $\log(K_{F,C})$  сначала уменьшается, достигая своего минимального значения при  $Q$ , равного 0,6, а затем снова возрастает. Такой характер изменения величины емкостно-частотного коэффициента может быть объяснен первоначальным повышением барьерных свойств покрытий за счет многослойного перекрывания чешуйчатых частиц пигментов и наполнителей друг другом. При дальнейшем увеличении содержания пигментной части, возможно, происходит постепенное нарушение плоскопараллельного расположения твердых частиц в покрытии, что

приводит к снижению барьерных свойств.

Потенциал разомкнутой цепи в диапазоне  $Q$  от 0,1 до 0,7 остается примерно на одном уровне, но смещен в более положительную область по сравнению с ненаполненным покрытием. При  $Q$  выше 0,7 происходит смещение потенциала в более электроотрицательную область, что может быть объяснено увеличением степени взаимодействия эпоксидного связующего с поверхностью дисперсных частиц пигментов и наполнителя и, как следствие, снижением взаимодействия с поверхностью стальной пластины.

При увеличении содержания пигментной части в покрытии в диапазоне  $Q$  от 0,1 до 0,7 происходит как возрастание адгезии, так и изменение характера разрушения материала: при  $Q$  от 0 до 0,3 наблюдается адгезионное отслаивание покрытия от субстрата, а при  $Q$  от 0,4 до 0,7 — когезионное разрушение, т.к. силы адгезии превышают силы когезии материала. Дальнейшее увеличение  $Q$  более 0,7 приводит к снижению адгезионной и когезионной прочности лакокрасочного покрытия. Прочность при ударе, аналогично адгезии, сначала возрастает в диапазоне  $Q$  от 0 до 0,6, а затем снижается.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно заключить, что максимальные защитные и лучшие физико-механические свойства имеют покрытия при значении  $Q$ , равном 0,6.

#### Выводы

В результате исследований установлены зависимости влияния состава пигментной части на физико-механические и защитные свойства покрытий, что может быть использовано для создания антикоррозионных эпоксидных лакокрасочных

Таблица 4 — Проверка математической модели и правильности оптимизации рецептуры  
Table 4 — Verification of the mathematical model and the correctness of the recipe optimization

Показатель	Значение показателя согласно модели	Значение показателя, определенное экспериментально
$\log(K_{F,C})$	-9,10	-8,93
$V_{pvc}$ , мВ	-25	-35
Адгезия, МПа	4,1	4,0
Прочность при ударе, см	21	23

Таблица 5 — Свойства покрытий с различным значением  $Q$   
Table 5 — Coating properties with different PVC/CPVC ratio

$Q$	$\log(K_{F,C})$	$V_{pvc}$ , мВ	Адгезия, МПа	Прочность при ударе,
0	-8,34	-200	1,5 (А)	20
0,1	-8,40	-30	1,5 (А)	22
0,2	-8,80	-25	1,5 (А)	23
0,3	-8,96	-20	2,0 (А/К)	23
0,4	-8,97	-20	4,0 (К)	24
0,5	-8,96	-25	4,5 (К)	25
0,6	-8,98	-30	4,5 (К)	27
0,7	-8,93	-35	4,0 (К)	23
0,8	-8,84	-115	4,0 (А/К)	23
0,9	-8,71	-327	2,5 (А/К)	22
1,0	-5,44	-585	0,5 (К)	22

Примечание. Адгезия, в скобках указан вид разрушения. А — адгезионное отслаивание, К — когезионное разрушение, А/К — адгезионно-когезионное разрушение

материалов с заданным комплексом свойств.

Методами математического моделирования определен состав пигментной части, позволяющий создавать высокоэффективные эпоксидные антикоррозионные лакокрасочные материалы, обладающими улучшенными барьерными свойствами: 39,7 об.% железной слюдки, 33,2 об.% алюминиевой пудры и 27,1 об.% микроталька. Экспериментально подтверждено, что увеличение доли алюминиевой пудры в составе пигментной части приводит к увеличению прочности при ударе.

Экспериментально показано, что увеличение коэффициента лакокрасочной системы  $Q$  приводит к улучшению барьерных свойств покрытий, росту адгезии и прочности при ударе, которые достигают своего максимума при  $Q$ , равном 0,6, после чего данные показатели начинают снижаться.

### Обозначения

КОКП, % — критическая объемная концентрация пигмента;  $M$ , г/100 г — маслосъемкость, г/100; ОКП, % — объемная концентрация пигмента;  $C$ , Ф — емкость;  $F$ , Гц — частота тока;  $K_{FC}$ , Ф — емкостно-частотный коэффициент;  $N$  — количество измерений в частотном диапазоне;  $Q$  — коэффициент лакокрасочной системы, равной ОКП/КОКП;  $V_{pc}$ , мВ — потенциал разомкнутой цепи.

### Литература

1. Spardha Jhamb, Markus Enekvist, Xiaodong Liang, Xiangping Zhang, Kim Dam-Johansen, Georgios M. Kontogeorgis. A review of computer-aided design of paints and coatings // *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2020, vol. 27, pp. 107–120. doi: 10.1016/j.coche.2019.12.005
2. Дринберг А. С., Ицко Э. Ф., Калининская Т. В. Антикоррозионные грунтовки. Санкт-Петербург : НИПРОИНС ЛКМ и П с ОП, 2006. 168 с.
3. Knudsen O. Ø., Forsgren A. *Corrosion Control Through Organic Coatings*. Boca Raton : CRC Press, 2017. 276 p. doi: 10.1201/9781315153186
4. Сороков А. В., Степин С. Н., Каюмов А. А., Ситнов С. А., Кузнецова О. П. Методы оценки противокоррозионной эффективности лакокрасочных покрытий // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15, № 24. С. 68–75.
5. *Electrochemical Evaluation Technologies of Organic Coatings* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.intechopen.com/books/coatings-and-thin-film-technologies/electrochemical-evaluation-technologies-of-organic-coatings> (дата обращения: 14.04.2021).
6. Fandi Meng, Li Liu, Wenliang Tian, Hang Wu, Ying Li, Tao Zhang, Fuhui Wang. The influence of the chemically bonded interface between fillers and binder on the failure behaviour of an epoxy coating under marine alternating hydrostatic pressure // *Corrosion Science*, 2015, vol. 101, pp. 139–154. doi: 10.1016/j.corsci.2015.09.011
7. Margarit-Mattos I. C. P. EIS and organic coatings performance: Revisiting some key points // *Electrochimica Acta*, 2020, vol. 354. doi: 10.1016/j.electacta.2020.136725

8. Головин В. А., Добрян С. А. Электрохимические и электрофизические методы неразрушающего контроля защитных полимерных покрытий // *Коррозия: материалы, защита*. 2020. № 12. С. 1–13. doi: 10.31044/1813-7016-2020-0-12-1-13
9. *Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment, and Applications* / eds.: Evgenij Barsoukov, J. Ross Macdonald. Second Edition. New Jersey : John Wiley & Sons, 2005. 595 с. doi:10.1002/0471716243
10. Потапчик А. Н., Егорова А. Л. Определение критической объемной концентрации пигментов в покрытиях на основе эпоксидных пленкообразователей: сравнение методов // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов*. Минск, 2019. С. 82–91.

### References

1. Spardha Jhamb, Markus Enekvist, Xiaodong Liang, Xiangping Zhang, Kim Dam-Johansen, Georgios M. Kontogeorgis. A review of computer-aided design of paints and coatings. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2020, vol. 27, pp. 107–120. doi: 10.1016/j.coche.2019.12.005
2. Drinberg A. S., Itsko E. F., Kalinskaya T. V. *Antikorrozionnye gruntovki* [Anti-corrosion primers]. Saint-Petersburg : NIPROINS LKM i P s OP Publ., 2006. 168 p.
3. Knudsen O. Ø., Forsgren A. *Corrosion Control Through Organic Coatings*. Boca Raton : CRC Press, 2017. 276 p. doi: 10.1201/9781315153186
4. Sorokov A. V., Stepin S. N., Kayumov A. A., Sitnov S. A., Kuznetsova O. P. Metody otsenki protivokorroziionnoy effektivnosti lakokrasochnykh pokrytiy [Methods for assessing the anticorrosive effectiveness of coatings]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2012, vol. 15, no. 24, pp. 68–75.
5. *Electrochemical Evaluation Technologies of Organic Coatings*. Available at: <https://www.intechopen.com/books/coatings-and-thin-film-technologies/electrochemical-evaluation-technologies-of-organic-coatings> (accessed 14 April 2021).
6. Fandi Meng, Li Liu, Wenliang Tian, Hang Wu, Ying Li, Tao Zhang, Fuhui Wang. The influence of the chemically bonded interface between fillers and binder on the failure behaviour of an epoxy coating under marine alternating hydrostatic pressure. *Corrosion Science*, 2015, vol. 101, pp. 139–154. doi: 10.1016/j.corsci.2015.09.011
7. Margarit-Mattos I. C. P. EIS and organic coatings performance: Revisiting some key points. *Electrochimica Acta*, 2020, vol. 354. doi: 10.1016/j.electacta.2020.136725
8. Golovin V. A., Dobriyan S. A. Elektrokhimicheskie i elektrofizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya zashchitnykh polimernykh pokrytiy [Electrochemical and electrophysical methods of non-destructive testing of protective polymer coatings]. *Korroziya: materialy, zashchita* [Corrosion: materials, protection], 2020, no. 12, pp. 1–13. doi: 10.31044/1813-7016-2020-0-12-1-13
9. *Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment, and Applications*. Eds.: Evgenij Barsoukov, J. Ross Macdonald. Second Edition. New Jersey : John Wiley & Sons, 2005. 595 p. doi: 10.1002/0471716243 p.
10. Potapchik A. N., Egorova A. L. Opredelenie kriticheskoy ob'emnoy kontsentratsii pigmentov v pokrytiyakh na osnove epoksidnykh plenkoobrazovateley: sravnenie metodov [Determination of the critical volumetric concentration of pigments in coatings based on epoxy film-formers: comparison of methods]. *Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov* [Advanced methods and technologies of materials development and processing]. Minsk, 2019, pp. 82–91.

Поступила в редакцию 30.04.2021

© А. Н. Потапчик, А. Л. Егорова, 2021