

УДК 678.6

Л. В. Левиев, Н. Р. Прокопчук

Белорусский государственный технологический университет

**ВЫБОР ПЛЕНКООБРАЗУЮЩЕГО И ОТВЕРДИТЕЛЯ
ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО АНТИКОРРОЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ**

На основании комплексного исследования влияния молекулярной структуры пленкообразующих и химического строения отвердителей на физико-химические параметры отвержденных неадгезированных пленок (паропроницаемость и обусловленная ею электрохимическая коррозия стали; содержание гель-фракции; коэффициент сшивания; коэффициент диффузии, коэффициент сохранения механических свойств после выдержки в агрессивной среде; константы скорости отверждения композиций; максимальная температура саморазогрева и объемная усадка отверждаемых композиций) обоснован выбор двухкомпонентной композиции для наиболее эффективного антикоррозионного покрытия по стали. Компонент А – эпоксиноволаквинилэфирная смола с функциональными добавками. Компонент Б – гидропероксид кумола. Содержание компонентов в композиции 98:2 мас. %.

Ключевые слова: лакокрасочная композиция, пленкообразующее, отвердитель, паропроницаемость, электрохимическая коррозия стали, коэффициент сшивания, константа скорости отверждения.

L. V. Leviev, N. R. Prokopchuk

Belarusian State Technological University

**SELECTION OF FILM FORMER AND HARDENER
FOR AN EFFECTIVE ANTICORROSION COATING**

On the basis of a complex study of the influence of the molecular structure of film-forming and chemical structure of hardeners on the physical and chemical parameters of hardened non-adhesive films (vapor permeability and the resulting electrochemical corrosion of steel, the content of the gel fraction, the coefficient of cross-linking, the diffusion coefficient, the coefficient of preservation of mechanical properties after aging in an aggressive environment, the constants of the curing rate of compositions, the maximum temperature of self-heating and the volume shrinkage of hardened compositions) the choice of two-component compositions for the most effective anticorrosive coating on steel is justified. Component A – epoxy novolac vinyl essential resin with functional additives. Component B is coumol hydroperoxide. Component content in the composition is 98:2 wt. %.

Key words: paint composition, film-forming, hardener, vapor permeability, electrochemical corrosion of steel, crosslinking coefficient, curing rate constant.

Введение. Современные лакокрасочные материалы (ЛКМ) для антикоррозионных покрытий являются сложными многокомпонентными системами [1], содержащими как моно-, так и полифункциональные ингредиенты. Важнейшим компонентом ЛКМ является полимерное связующее, от которого во многом зависят свойства покрытия. Известно, что химическая структура полимера вносит решающий вклад в защитные свойства покрытий [2]. Среди наиболее подходящих связующих для создания химически стойких покрытий, способных выдерживать комплексное воздействие кислот, щелочей, сильных окислителей, растворителей и других химических сред как малой, так и высокой концентрации, следует выделить эпоксидные, полиэфирные и эпоксивинильные смолы. В сравнении с покрытиями на основе эпоксидных и полиэфирных смол научно-техническая информация по материалам на основе эпоксиноволаквинилэфирных смол существенно ограничена. Это определяет перспективы и возможности

по созданию новых антикоррозионных полимерных покрытий с уникальными характеристиками на основе данных смол. Устойчивость к химической деструкции (агрессивостойкость) и антикоррозионные (защитные) свойства покрытий во многом зависят от количества макро- и микродефектов в надмолекулярной структуре полимерных покрытий. К таким дефектам относятся: микропустоты, образующиеся вследствие захвата воздуха при перемешивании ЛКМ; микропустоты, формирующиеся в процессе интенсивного газовыделения в экзотермическом процессе отверждения композиций; микрократеры, образующиеся в результате диффузии газов при отверждении композиции к границе раздела фаз газ – покрытие и «схлопывания» пузырей; нарушение регулярности в расположении поперечных химических сшивок и плотности сетчатой пространственной структуры; образование микротрещин из-за неэффективного перераспределения внутренних напряжений.

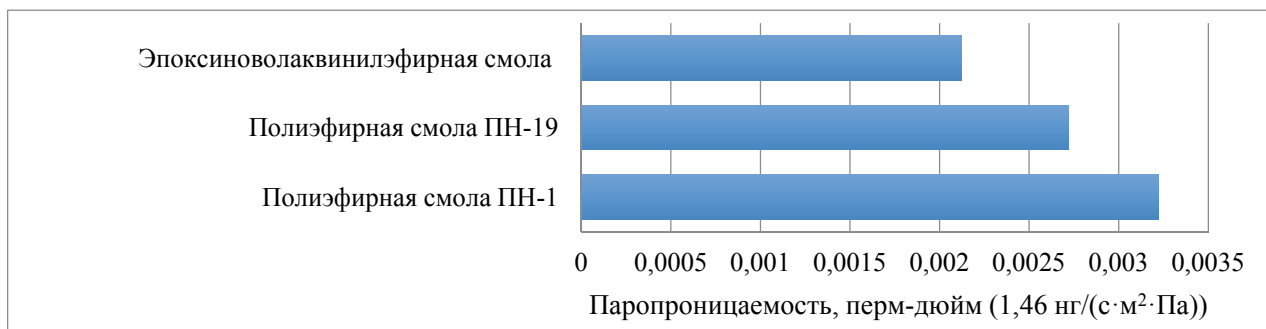


Рис. 1. Паропроницаемость полимерных пленок на основе различных смол

О количественном содержании всех видов дефектов в полимерных пленках судят по их паропроницаемости.

Цель настоящей работы – обосновать выбор пленкообразующего и отвердителя в составе лакокрасочной композиции для наиболее эффективного антикоррозионного покрытия по стали.

Методическая часть. Для сравнительной оценки паропроницаемости полимерных неадгезированных пленок из трех пленкообразующих разного химического строения: полиэфирной смолы общего назначения ПН-1, полиэфирной смолы для химстойких покрытий НПС-9119 [3] и эпоксисоволаквинилэфирной смолы молекулярной структуры [4] получены ненаполненные, непигментированные двухкомпонентные композиции. Состав компонента А для трех пленкообразующих: смола – 99,76 мас. %; 12%-ный раствор октоата кобальта в стироле (сиккатив) – 0,12 мас. %; N,N'-диметиланилин (инициатор) – 0,12 мас. %. Компонент Б – гидропероксид кумола (отвердитель). Содержание компонентов в композициях: компонент А – 98 мас. %, компонент Б – 2 мас. %. Паропроницаемость определяли по ГОСТ 25898-2012 [5]. Коэффициент сшивания γ , число сшитых звеньев, приходящихся на одну макромолекулу, рассчитывали по формуле [6]

$$\gamma = \frac{1}{S + \sqrt{S}}, \quad (1)$$

где S – содержание золь-фракции.

Содержание гель- и золь-фракции определяли экстрагированием образцов в кипящем толуоле на аппарате Сокслета.

Методики определения коэффициентов диффузии, сорбции и проницаемости описаны в публикации [7].

Экспериментальная часть. Результаты определения паропроницаемости полимерных пленок из трех сравниваемых композиций представлены на рис. 1.

Из данных рис. 1 однозначно следует, что наименьшей паропроницаемостью обладают пленки на основе эпоксисоволаквинилэфирной смолы. Дополнительно к данным паропроницаемости определены параметры пространственной химической сетки пленок путем их экстрагирования в кипящем толуоле (коэффициент сшивания) и диффузионно-сорбционные характеристики – в холодном толуоле (табл. 1).

Данные, представленные в табл. 1, коррелируют с данными по паропроницаемости. Коэффициент проницаемости закономерно равен произведению коэффициентов сорбции и диффузии.

Пленки из эпоксисоволаквинилэфирной смолы характеризуются наибольшим коэффициентом сшивания и наименьшим коэффициентом диффузии, сорбции и проницаемости. Это указывает на наиболее высокую коррозионную стойкость стальных поверхностей под лакокрасочным покрытием на основе эпоксисоволаквинилэфирного пленкообразующего, обеспечивающего наименьшую проницаемость агрессивной среды к металлу.

Таблица 1

Коэффициенты сшивания, диффузии и сорбции (анализы проводились после 7 сут отверждения)

Показатель	Материал на основе		
	ПН-1	НПС-9119	Эпоксисоволаквинилэфирная смола
Содержание гель-фракции, %	88	90	94
Содержание золь-фракции, %	12	10	6
Коэффициент сшивания	1,05	2,40	3,28
Коэффициент диффузии, $10^7 \text{ см}^2/\text{с}$	4,18	3,94	3,7
Коэффициент сорбции, $\text{г}/\text{см}^3$	0,93	0,82	0,77
Коэффициент проницаемости, $10^8 \text{ г}\cdot\text{см}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$	3,87	3,23	2,86

Таблица 2

Коэффициент старения свойств пленок после их выдержки в агрессивных средах

Коэффициент старения при условиях выдержки	Отвержденный материал на основе смолы		
	ПН-1	НПС-9119	Эпоксидноволаковинилэфирная смола
В дистиллированной воде при 25°C (100 сут) по показателю:			
– прочность при сжатии	0,34	0,38	0,64
– твердость по Барколу	0,47	0,55	0,78
– удлинение при разрыве	0,41	0,48	0,67
В дистиллированной воде при 100°C (3 сут) по показателю:			
– прочность при сжатии	0,53	0,59	0,64
– твердость по Барколу	0,59	0,70	0,78
– удлинение при разрыве	0,60	0,63	0,67
В 10%-ном растворе гидроксида натрия при 25°C (3 сут) по показателю:			
– прочность при сжатии	0,31	0,35	0,38
– твердость по Барколу	0,42	0,45	0,47
– удлинение при разрыве	0,37	0,41	0,43
В 10%-ном растворе серной кислоты при 25°C (100 сут) по показателю:			
– прочность при сжатии	0,67	0,73	0,79
– твердость по Барколу	0,78	0,84	0,89
– удлинение при разрыве	0,65	0,71	0,74
В 10%-ном растворе хлористоводородной кислоты при 25°C (100 сут) по показателю:			
– прочность при сжатии	0,39	0,43	0,48
– твердость по Барколу	0,48	0,49	0,53
– удлинение при разрыве	0,42	0,47	0,52
В концентрированном растворе хлорида натрия при 25°C (100 сут) по показателю:			
– прочность при сжатии	0,57	0,64	0,76
– твердость по Барколу	0,67	0,73	0,84
– удлинение при разрыве	0,63	0,63	0,74

При соприкосновении металлической поверхности с водой или водными растворами протекают два сопряженных процесса (электрохимическая коррозия):

1) переход ионов металла в раствор с образованием сольватированных ионов (окислительный или анодный процесс: $\text{Me} + m \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Me}^{n+} \cdot m \cdot \text{H}_2\text{O} + ne^-$);

2) переход этих ионов из раствора на поверхность металла в виде нейтральных атомов, входящих в кристаллическую решетку металла (восстановительный или катодный процесс: $\text{Me}^{n+} \cdot m \cdot \text{H}_2\text{O} + ne^- \rightarrow \text{Me} + m \cdot \text{H}_2\text{O}$) [8, 9].

Торможение процесса коррозии металла под покрытием V_t представляется суммой обратных величин: проницаемости P по отношению к агрессивному агенту, его адсорбции $V_{\text{адс}}$ на поверхности металла и скорости анодной реакции V_a :

$$V_t = \frac{1}{P} + \frac{1}{V_{\text{адс}}} + \frac{1}{V_a}. \quad (2)$$

В случае высокоактивных сред (растворы кислот, другие агрессивные жидкости и газы), когда практически отсутствует торможение

анодного процесса ионизации металла, а степень адсорбции коррозионного агента велика, защитная способность покрытий в основном определяется проницаемостью пленки [8].

Устойчивость к химической деструкции (агрессивостойкость) неадгезированных пленок протестирована на сохранение их физико-механических свойств после выдержки в различных агрессивных средах (табл. 2).

Из данных табл. 2 следует, что коэффициенты сохранения прочности при сжатии, твердости по Барколу, удлинения при разрыве пленок на основе эпоксиноволаковинилэфирной смолы выше, чем пленок на основе ПН-1 и НПС-9119 в воде, растворах хлорида натрия, серной и соляной кислот.

Известно [10, 11], что химическая структура пероксидов и гидропероксидов может существенно влиять на кинетические параметры отверждения пленкообразующих, структуру и свойства отвержденных пленок. Для достижения оптимального уровня свойств пленок на основе эпоксиноволаковинилэфирной смолы изучено влияние химического строения отвердителей на комплекс

их свойств: паропроницаемость, реологические константы скорости отверждения, коэффициент сшивания, максимальную температуру саморазогрева, объемную усадку. На рис. 2 представлены данные по влиянию отвердителей на паропроницаемость пленок.

Как показано на рис. 2, паропроницаемость материалов увеличивается при использовании инициаторов полимеризации в ряду гидропероксид кумола < гидропероксид *трет*-бутила < пероксид *трет*-бутила < пероксид бензоила < пероксид циклогексанона < пероксид ацетилацетона <

< смесь перексидов кетонов < пероксид метилэтилкетона. При этом наименьшие значения по паропроницаемости материалов достигаются при содержании инициаторов, независимо от их химической структуры, в количестве 1,5–2,5 мас. % с экстремумом в области 2 мас. %. Установлено, что увеличение концентрации инициаторов свыше 3 мас. % нецелесообразно по причине существенного снижения жизнеспособности композиций и, кроме того, способствует повышению взрывоопасной обстановки при смешивании инициатора с компонентом А.

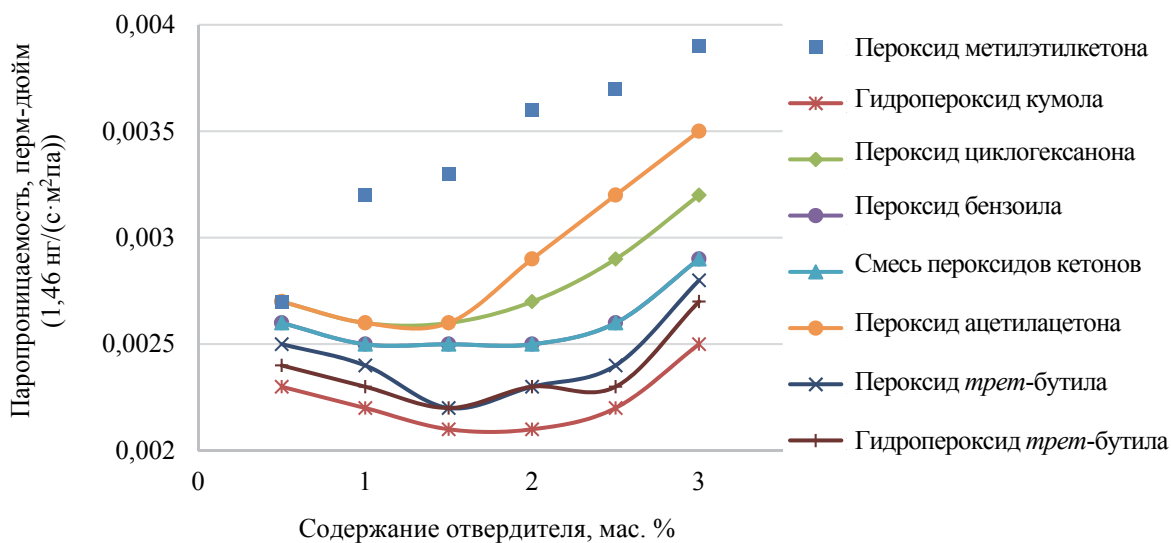


Рис. 2. Зависимость паропроницаемости пленок от химического строения отвердителей

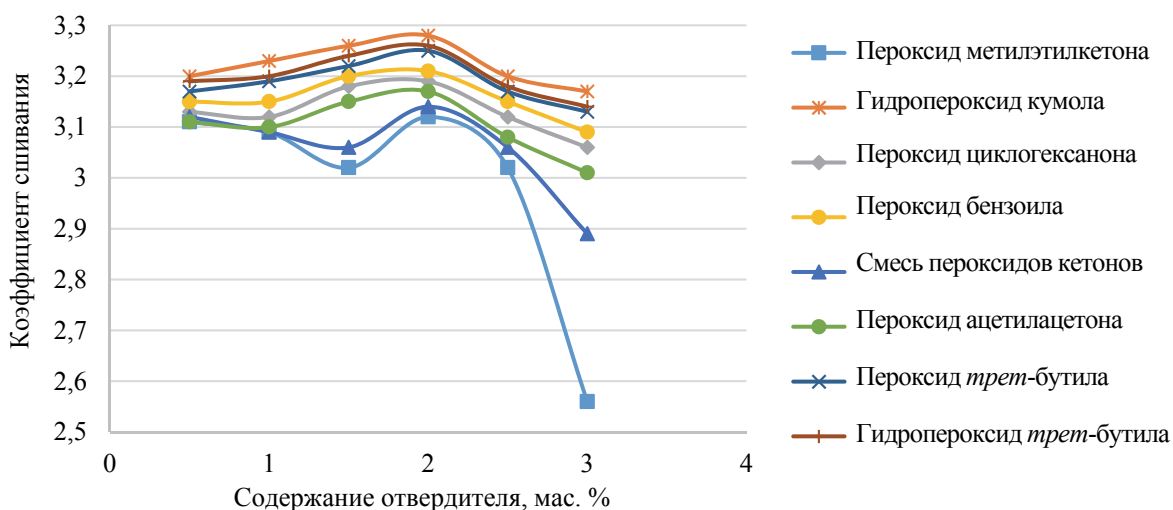


Рис. 3. Зависимость коэффициента сшивания пленок на основе эпоксиноволаквинилэфирной смолы от химической природы и содержания отвердителя

Выявлена четкая корреляция между паропроницаемостью пленок и коэффициентом их сшивания (рис. 3). Наибольшее значение коэффициента сшивания для всех отвердителей наблюдается при их содержании в композиции 2,0 мас. %.

Передозировка отвердителя приводит к формированию дефектной пространственной сетки, снижению коэффициента сшивания и, соответственно, увеличению паропроницаемости. Это подтверждается также данными по максимальной

температуре саморазогрева композиций в процессе их отверждения (рис. 4).

Превышение содержания всех изученных отвердителей в композициях свыше 2 мас. % увеличивает максимальную температуру их саморазогрева при отверждении.

Отмечено, что при использовании пероксида метилэтилкетона, смеси пероксидов кетонов, пероксида ацетилацетона и пероксида циклогексана наблюдается пенообразование на поверхности композиций. Особенно явно это проявляется при использовании пероксида метилэтилкетона. Отвержденные композиции с помощью перечисленных отвердителей имеют наибольшие значения экзотермических пиков из саморазогрева.

Для того чтобы объяснить данный эффект, проведены исследования по изучению кинетических параметров отверждения. В этом отношении наиболее полную картину по изменению свойств композиций в процессе отверждения позволяют получить реокинетические исследования [12, 13]. В общем виде изменение вязкости исследуемых композиций в процессе отверждения происходит следующим образом.

В начале процесса отверждения наблюдается небольшое изменение вязкости композиций, связанное с образованием и накоплением в системе радикалов, это так называемый индукционный период, характеризуемый временем $\tau_{\text{инд}}$, а затем происходит экстремальное увеличение вязкости композиций по причине происходящих цепных реакций, хорошо описанных в работе [14]. Учитывая характер реокинетических кривых, близкий к экспоненциальному, экспериментальные данные аппроксимировались следующим уравнением:

$$\ln \eta_{\tau} = \ln \eta_0 + k_{\eta} \cdot \tau, \quad (3)$$

где η_{τ} , η_0 – текущая и начальная вязкость композиции; k_{η} – реокинетическая константа скорости отверждения; τ – время отверждения.

Обнаружено, что анаморфозы реокинетических кривых в полулогарифмических координатах характеризуются двумя прямолинейными участками. При этом, по-видимому, точка перегиба на анаморфозах реокинетических кривых соответствует образованию пространственной сетки.

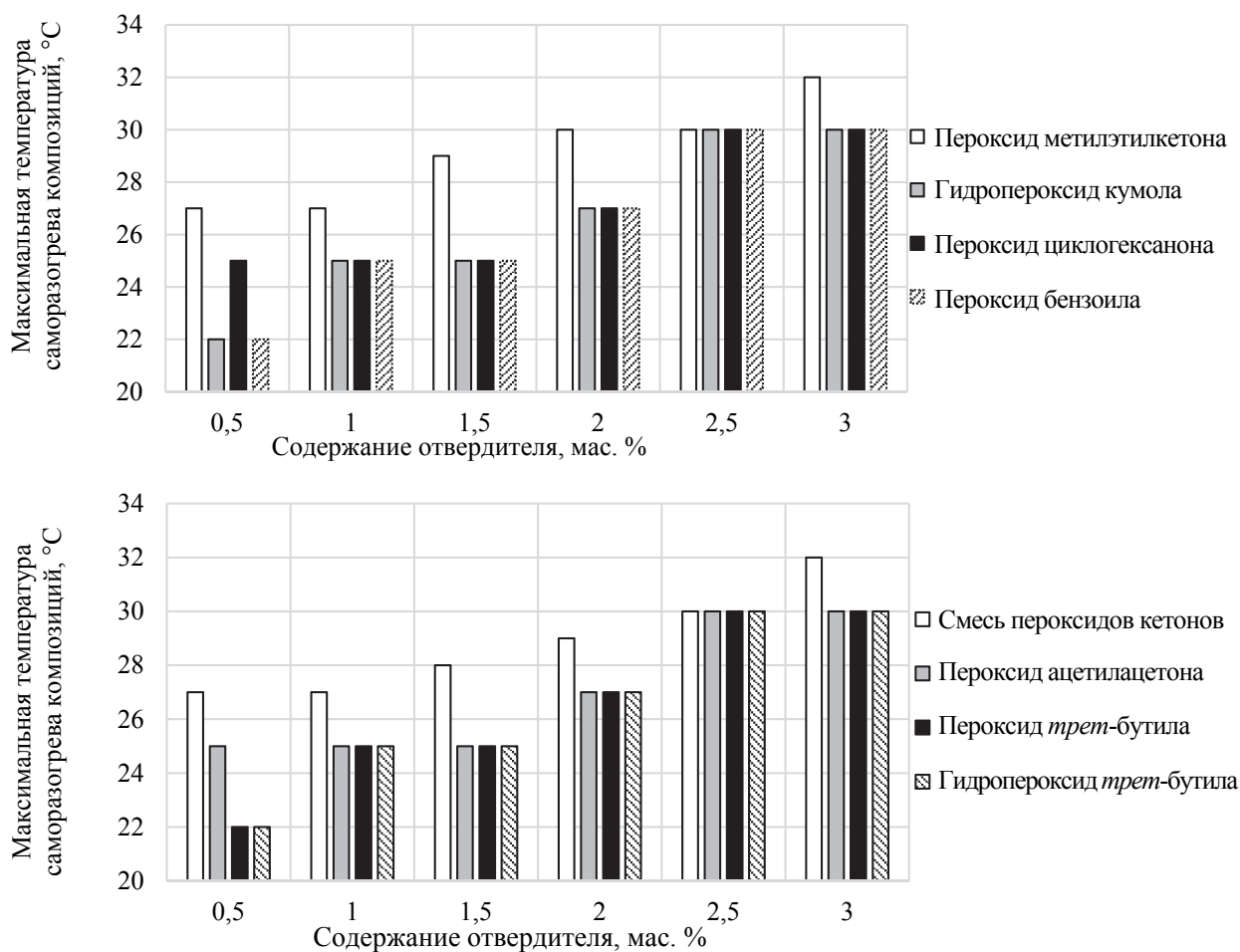


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры саморазогрева композиций от химической природы и содержания отвердителя

Таблица 3

Влияние природы и содержания отвердителей на реокинетические константы скорости отверждения композиций

Отвердитель	Реокинетические константы скорости отверждения $k_{\eta 1} \cdot 10^2, \text{мин}^{-1} / k_{\eta 2} \cdot 10^2, \text{мин}^{-1}$, при содержании отвердителя, мас. %					
	0,5	1	1,5	2,0	2,5	3,0
Пероксид метилэтилкетона	0,14/12,87	0,34/13,65	0,45/14,54	0,67/21,87	0,89/24,87	1,75/33,23
Гидропероксид кумола	0,08/12,12	0,10/12,15	0,12/12,18	0,15/12,23	0,18/12,45	0,23/12,53
Пероксид циклогексанона	0,11/12,45	0,24/13,19	0,32/14,43	0,45/17,43	0,76/21,02	0,97/24,23
Пероксид бензоила	0,09/12,14	0,14/12,34	0,20/13,78	0,26/15,17	0,45/17,23	0,56/19,76
Смесь пероксидов кетонов	0,14/12,67	0,35/13,87	0,49/14,87	0,65/21,98	0,96/24,99	1,78/33,78
Пероксид ацетилацетона	0,14/12,98	0,34/14,35	0,45/15,89	0,67/22,34	0,89/25,67	1,77/33,45
Пероксид <i>трет</i> -бутила	0,05/12,01	0,07/12,11	0,10/12,12	0,12/12,20	0,14/12,42	0,20/12,49
Гидропероксид <i>трет</i> -бутила	0,07/12,02	0,09/12,12	0,11/12,15	0,13/12,21	0,15/12,43	0,22/12,50

С увеличением содержания отвердителей разделение анаморфоз реокинетических кривых на участки становится более заметным. Следует отметить, что изменение вязкости регистрировалось до момента сохранения композициями текучего состояния с учетом максимального диапазона измерений используемого ротационного вискозиметра. Для оценки влияния природы и содержания отвердителей на отверждение композиций были определены реокинетические константы скорости $k_{\eta 1}$ и $k_{\eta 2}$. Сопоставление данных (табл. 3) позволяет сделать вывод о том, что для составов, характеризующихся максимальными значениями реокинетических констант, присущи также максимальные значения по температуре саморазогрева и усадке композиций.

Как следует из данных табл. 3, наиболее медленно формируют пространственную химическую сетку отвердители: пероксид *трет*-бутила, гидропероксид *трет*-бутила, гидропероксид кумола. Эти отвердители формируют наиболее совершенную, малодефектную пространственную сетку.

На основании экспериментальных данных по паропроницаемости, коэффициенту сшивания, максимальной температуре саморазогрева композиций при их отверждении, константам скорости отверждения оптимальным отвердителем, формирующим наилучшую пространственную сетчатую структуру пленок на основе эпоксиноволаквинилэфирной смолы, является гидропероксид кумола в количестве 2,0 мас. %.

Заключение. Экспериментально обоснован выбор пленкообразующего и отвердителя с целью последующей разработки рецептуры двухкомпонентного лакокрасочного материала для высокоэффективной антикоррозионной защиты стали. Проведена сравнительная оценка свойств свободных неадгезированных пленок на основе полиэфирной смолы общего назначения ПН-12, полиэфирной смолы для химстойких покрытий НПМ-9119, эпоксиноволаквинилэфирной смолы и восьми отвердителей (пероксидов и гидропероксидов разного химического строения) по ряду показателей: паропроницаемость, коэффициент сшивания олигомерных молекул, содержание гель-фракции, коэффициент диффузии, коэффициент сохранения механических свойств после выдержки в агрессивных средах, максимальная температура саморазогрева при отверждении композиций, константа скорости отверждения. Отмечена роль воды и водных растворов в подпленочной электрохимической коррозии металла. Показано, что пленки на основе эпоксиноволаквинилэфирной смолы, отвержденной 2,0 мас. % гидропероксида кумола, обладают наиболее плотной бездефектной сетчатой структурой, формируемой с минимальными скоростями и температурами саморазогрева в процессе сшивания и олигомерных молекул пленкообразователя. Такая защитная пленка обеспечивает минимальное проникновение агрессивной среды к поверхности металла и, следовательно, максимальную его антикоррозионную защиту.

Литература

1. Фрейтаг В., Стойе Д. Краски, покрытия и растворители: СПб.: Профессия, 2007. 528 с.
2. Воробьева Г. Я. Химическая стойкость полимерных материалов. М.: Химия, 1981. 296 с.
3. Бениг Г. В. Ненасыщенные полиэфирсы. Структура и свойства. М.: Химия, 1968. 256 с.

4. Левиев Л. В., Прокопчук Н. Р. Влияние стеклянных чешуек на реологию и отверждение композиций на основе эпоксиноволаквинилэфирной смолы // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геология. 2018. № 1. С. 9–16.
5. Материалы и изделия строительные. Методы определения сопротивления паропрооницанию: ГОСТ 25898-2012. Введ. 01.01.2014. М.: Росстандарт: Изд-во стандартов, 2014. 12 с.
6. Никитин Л. Н., Меринов И. Г., Саид-Галиев Э. Е. Применение формул зависимости коэффициента сшивания для случая произвольной полидисперсности полимера в статической теории сеток // Механика композитных материалов. 1990. № 3. С. 553–556.
7. Левиев Л. В., Прокопчук Н. Р. Покрытия повышенной химстойкости на основе эпоксиноволаквинилэфирной смолы // Полимерные материалы и технологии. 2018. Т. 4. № 2. С. 41–49.
8. Лазуткина О. Р. Химическое сопротивление и защита от коррозии. Екатеринбург: Изд-во Урал-ун-та. 2014. 140 с.
9. Розенфельд И. Л., Рубинштейн Ф. И., Жигалова К. А. Защита металлов от коррозии лакокрасочными покрытиями. М.: Химия, 1987. 224 с.
10. Седов Л. Н., Михайлова З. В. Ненасыщенные полиэфиры. М.: Химия, 1977. 232 с.
11. Иржак В. И., Розенберг Б. А., Ениколопян Н. С. Сетчатые полимеры (синтез, структура, свойства). М.: Наука, 1979. 248 с.
12. Малкин А. Я., Куличихин С. Г. Реология в процессах образования и превращения полимеров. М.: Химия, 1985. 240 с.
13. Малкин А. Я., Исаев А. И. Реология, концепции, методы, приложения. СПб.: Профессия, 2007. 560 с.
14. Иванчев С. С. Радикальная полимеризация. Л.: Химия, 1985. 280 с.

References

1. Freytag V., Stoye D. *Kraski, pokrytiya i rastvoriteli* [Paints, coatings and solvents]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2007. 528 p.
2. Vorob'eva G. Ya. *Khimicheskaya stoykost' polimernykh materialov* [Chemical resistance of polymeric materials]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 296 p.
3. Benig G. V. *Nenasyshchennyye poliefiry. Stroyeniye i svoystva* [Unsaturated polyesters. Structure and properties]. Moscow, Khimiya Publ., 1968. 256 p.
4. Leviev L. V., Prokopchuk N. R. Influence of glass flakes addition on epoxy-novolac-vinylether resin compositions rheology and curing. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geocology, 2018, no. 1, pp. 9–16 (In Russian).
5. GOST 25898-2012. Building materials and products. Methods for determining vapor resistance. Moscow, Rosstandart Publ., Izdatel'stvo standartov Publ., 2014. 12 p. (In Russian).
6. Nikitin L. N., Merinov I. G., Said-Galiev E. E. The use of formulas for the dependence of the crosslinking coefficient for the case of an arbitrary polydispersity of the polymer in the static theory of meshes. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Mechanics of composite materials], 1990, no. 3, pp. 553–556 (In Russian).
7. Leviev L. V., Prokopchuk N. R. Epoxy-resin-vinyl ester resin-based enhanced chemical resistance coatings. *Polimernyye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2018, vol. 4, no. 2, pp. 41–49 (In Russian).
8. Lazutkina O. R. *Khimicheskoye soprotivleniye i zashchita ot korrozii* [Chemical Resistance and Corrosion Protection]. Ekaterinburg, Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta Publ., 2014. 140 p.
9. Rozenfel'd I. L., Rubinshteyn F. I., Zhigalova K. A. *Zashchita metallov ot korrozii lakokrasochnymi pokryiyami* [Protection of metals from corrosion by paintwork]. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 224 p.
10. Sedov L. N., Mikhaylova Z. V. *Nenasyshchennyye poliefiry* [Unsaturated polyesters]. Moscow: Khimiya Publ., 1977. 232 p.
11. Irzhak V. I., Rozenberg B. A., Enikolopyan N. S. *Setchatyye polimery (sintez, struktura, svoystva)* [Mesh polymers (synthesis, structure, properties)]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 248 p.
12. Malkin A. Ya., Kulichikhin S. G. *Reologiya v protsessakh obrazovaniya i prevrashcheniya polimerov* [Rheology in the processes of formation and transformation of polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 240 p.
13. Malkin A. Ya., Isaev A. I. *Reologiya, kontseptsii, metody, prilozheniya* [Rheology, concepts, methods, applications]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2007. 560 p.
14. Ivanchev S. S. *Radikal'naya polimerizatsiya* [Radical polymerization]. Leningrad, Khimiya Publ., 1985. 280 p.

Информация об авторах

Левиев Лев Владимирович – аспирант кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lev.leviev@akzonobel.com

Прокопчук Николай Романович – доктор химических наук, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, Республика Беларусь). E-mail: nrprok@gmail.com

Information about the authors

Leviev Lev Vladimirovich – graduate student, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lev.leviev@akzonobel.com

Prokopchuk Nikolay Romanovich – DSc Chemistry, Corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, the Department of Polymer Composites Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nrprok@gmail.com

Поступила 13.11.2019