

УДК 678.026

В.А. Кузнецова¹, Е.В. Куршев¹, А.А. Силаева¹, С.А. Марченко¹

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНОГО ПЛЕНКООБРАЗУЮЩЕГО НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ВЛАГОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-87-96

Исследованы фазовая структура, адгезия, физико-механические свойства и водостойкость лаковых покрытий на основе модифицированных и немодифицированных эпоксидных пленкообразователей, отвержденных кремнийорганическим амином АСОТ-2 и низкомолекулярным полиамидом ПО-200. Установлено, что на процесс структурообразования ненаполненных эпоксидных композиций существенное влияние оказывает каждый компонент полимерной системы. Полученные результаты определения адгезии, физико-механических свойств и водостойкости коррелируют с результатами исследований фазовой структуры покрытий, полученных на основе модифицированных и немодифицированных эпоксидных композиций, отвержденных кремнийорганическим амином АСОТ-2 и низкомолекулярным полиамидом ПО-200.

Ключевые слова: фазовая структура, полимерные пленкообразователи, адгезия, водопоглощение, физико-механические свойства.

V.A. Kuznetsova¹, E.V. Kurshev¹, A.A. Silaeva¹, S.A. Marchenko¹

INFLUENCE OF PHASE STRUCTURE POLYMERIC FILMFORMER ON PHYSICAL MECHANICAL AND WATER RESISTANT PROPERTIES OF COATINGS

The phase structure, adhesion and physical mechanical properties, water resistance of varnish coatings on the basis of the modified and not modified epoxy filmformers, with organic silicon ammine «АСОТ-2» and low-molecular «ПО-200» polyamide as curing agents. It is established that the process of structurization of unfilled epoxy compositions depends on each component of polymeric system. The received results of determination of adhesion, physical mechanical properties, water resistance correlate with results of researches of phase structure of the coatings received on the basis of modified and not modified epoxy compositions, with organic silicon ammine «АСОТ-2» and low-molecular «ПО-200» polyamide as curing agents.

Keywords: phase structure, polymeric filmformer, adhesion, water absorption, physical mechanical properties.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Многолетний опыт эксплуатации различных изделий авиационной техники показал, что при правильном выборе и построении системы покрытий обеспечивается надежная защита конструкций при эксплуатации [1–5].

Успешная эффективная защита конструкции зависит от правильного выбора системы лакокрасочного покрытия, подготовки поверхности с учетом конструктивных особенностей детали, узла, агрегата, а также условий эксплуатации и других факторов.

Под системой покрытий подразумевается оптимальное количество слоев грунтовки и изолирующих слоев эмали, обеспечивающих максимальный уровень свойств в определенных условиях эксплуатации. Следует отметить, что характеристики грунтовочного покрытия для обеспечения адгезии и повышения защитных свойств системы покрытий являются решающими. В связи с этим к защитным лакокрасочным покрытиям предъявляются специфические требования в зависимости от их назначения и условий эксплуатации. Особенно высокие требования предъявляются к защитным лакокрасочным покрытиям, которые работают в условиях повышенной влажности [6–9].

Водостойкость лакокрасочных покрытий характеризуется способностью защищать окрашенную поверхность от контакта с водой. Эффективность защиты от воздействия влаги зависит как от свойств отвержденного покрытия, так и от внешних условий, определяющих сорбцию и скорость диффузии влаги в пленке покрытия, а также от температуры и относительной влажности воздуха. С увеличением влажности воздуха водопоглощение увеличивается. Повышенная температура существенно ускоряет процессы диффузии влаги в покрытие, что увеличивает его водопоглощение. Однако наиболее сильное влияние на водопоглощение покрытий оказывают: состав полимерного пленкообразующего, его химическая природа, технология формирования покрытия, а также его фазовая структура [10–13].

Для получения лакокрасочных покрытий широко используются эпоксидные олигомеры, обладающие высокой адгезией к металлическим и неметаллическим поверхностям, стойкостью к действию воды, щелочей, кислот, невысокой пористостью, низким показателем водопоглощения. Формирование покрытий на подложке сопровождается усадочными явлениями. При отсутствии полной релаксации усадка приводит к возникновению остаточных (внутренних) напряжений. Таким образом, большинство лакокрасочных покрытий – на основе жесткоцепных аморфных или кристаллических полимеров – представляет собой напряженные системы [14–17].

Очень часто для повышения конкретных свойств лакокрасочных покрытий используют полимерные модификаторы – в частности, эластомеры и лапроксиды, применение которых в эпоксидных полимерных матрицах позволяет повысить свойства полимерного покрытия: эластичность, устойчивость к действию воды, агрессивных жидкостей и др.

Присутствие эластомерных модификаторов в полимерном пленкообразующем способствует повышению молекулярной подвижности макромолекул полимерной матрицы и эластичности, а также уменьшению внутренних напряжений и жесткости покрытий. В многокомпонентных полимерных системах, к которым относятся исследуемые в данной работе модифицированные эпоксидные пленкообразующие, в момент пленкообразования может возникать неоднородность структуры в результате микро- и макрорасслоений компонентов, выпотевания или кристаллизации пластификаторов, что существенно влияет на свойства отвержденного пленкообразующего [18–22].

Данная работа посвящена исследованию влияния фазовой структуры полимерного пленкообразователя, используемого для получения антикоррозионных грунтовочных покрытий, на их адгезионные, физико-механические и влагозащитные свойства.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия» комплексной научной проблемы 17.7. «Лакокрасочные материалы и покрытия на полимерной основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [23].

Материалы и методы

В данной работе исследовано влияние фазовой структуры полимерных пленкообразователей на основе эпоксидной смолы Э-41, модифицированной полисульфидным каучуком марки 1 и Лапроксидом АФ (олигоэфирэпоксидом), на их адгезию, физико-механические свойства и водостойкость.

Жидкий полисульфидный каучук (тиокол марки 1), широко используемый для изготовления герметиков, применяется в качестве модификатора и в эпоксидных лакокрасочных покрытиях. Присутствие в основной цепи полисульфидного каучука серы способствует повышению устойчивости покрытий к топливу, маслам, воздействию кислорода, а также эластичности покрытий.

Лапроксиды – реакционноспособные разбавители также используются в качестве модификаторов эпоксидных смол. Благодаря наличию эпоксидных групп лапроксиды встраиваются в процессе отверждения в полимерную сетку, что исключает в дальнейшем их миграцию и выпотевание из покрытия и связанное с этим ухудшение свойств в процессе эксплуатации [24–25].

Характеристики используемых модификаторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики используемых модификаторов

Модификатор	Массовая доля функциональных групп	Вязкость при температуре 25 °С
Жидкий тиокол марки 1	2,2–3,3 – (SH)-групп	150–300 Па
Моноглицидиловый эфир алкил-фенола (Лапроксид АФ) – реакционноспособный разбавитель и модификатор эпоксидных смол	11–14 – эпоксидных групп	100–150 мПа

Для отверждения эпоксидных композиций использованы отвердители аминного типа:

- низкомолекулярный полиамид ПО-200 (средняя молекулярная масса ~2800), который используется в виде 30 %-ного раствора в ксилоле;
- сконденсированный γ -аминопропилтриэтоксисилан – АСОТ-2 (50 %-ный раствор в циклогексаноне).

Изготовленные композиции пленкообразователей (лаков) наносили на образцы из сплава Д16-АТ Ан.Окс.нхр методом пневматического распыления, после отверждения получили лаковые покрытия. Толщина двухслойных покрытий составляла 35–42 мкм. Двухслойные лаковые покрытия отверждали при температуре 100 °С в течение 2 ч. Исследования фазовой структуры лаковых покрытий проводили с применением сканирующего электронного микроскопа JSM-35CF в режиме вторичных электронов.

Подготовка образцов для микроструктурных исследований включала следующие этапы:

- приклеивание образцов с помощью клея и токопроводящей ленты на основе углерода к держателям образцов;
- ионно-плазменное травление поверхностей покрытий в вакуумной установке JFC-1100 (Jeol);
- металлизация золотом поверхностей исследуемых образцов в вакуумной установке магнетронного распыления Q150R ES (Quorum Technologies).

Ионно-плазменное травление позволяет выявлять сверхтонкую структуру материала при его исследовании. Вакуумная металлизация обеспечивает снятие электрических зарядов с поверхностей образцов покрытия при исследовании на сканирующем электронном микроскопе.

При определении водопоглощения использовали образцы из алюминиевой фольги толщиной 150 мкм, на которые наносили лаковые покрытия. Водопоглощение лаковых покрытий определяли в соответствии с ГОСТ 21513–76 после выдержки в дистиллированной воде в течение 30 сут.

Физико-механические свойства лаковых покрытий определяли в соответствии со стандартными методами: прочность при ударе – по ГОСТ 4765–73, прочность пленки покрытия при растяжении (эластичность) – по ГОСТ 29309–2007; адгезию покрытий – по ГОСТ 15140–78 в исходном состоянии и после выдержки в дистиллированной воде в течение 7 сут.

Результаты и обсуждение

Для проведения исследований изготовлены полимерные композиции на основе эпоксидного пленкообразующего, модифицированного жидким тиоколом марки 1 и Лапроксидом АФ.

Исследование фазовой структуры и свойств лаковых покрытий на основе модифицированных эпоксидных пленкообразователей проводили в сравнении с немодифицированными композициями на основе эпоксидного олигомера Э-41.

На рис. 1 приведены результаты определения микрофазовой структуры эпоксидной композиции, отвержденной кремнийорганическим амином АСОТ-2.

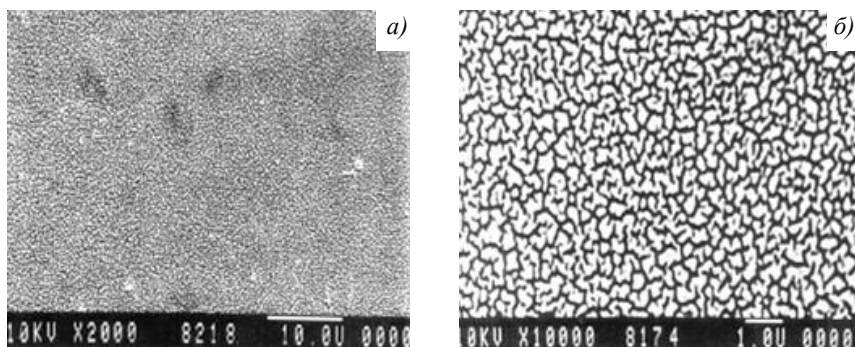


Рис. 1. Общий вид ($a - \times 2000$) и микрофазовая структура ($b - \times 10000$) лаковой композиции Э-41 + АСОТ-2

Видно, что структура полимерной композиции, состоящей из эпоксидного олигомера Э-41 и отвердителя АСОТ-2, однородная и состоит из частиц мелкодисперсной фазы, равномерно распределенной в дисперсионной среде. Размеры дисперсных частиц находятся в интервале от 0,2 до 0,5 мкм. Дефектов в виде пор и микротрещин не обнаружено.

Введение в эпоксидную композицию, отверждаемую кремнийорганическим амином АСОТ-2, полисульфидного каучука (тиокола марки 1) приводит к изменению фазовой структуры (рис. 2).

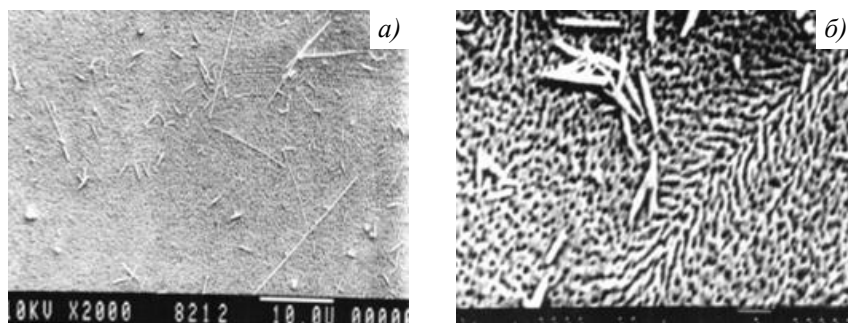


Рис. 2. Общий вид ($a - \times 2000$) и микрофазовая структура с игольчатыми образованиями ($b - \times 10000$) лаковой композиции Э-41 + тиокол 1 + АСОТ-2

В этом случае в композиции наблюдается выделение игольчатых структурных элементов, длина которых достигает 50 мкм, а их толщина составляет ~0,1 мкм. Это свидетельствует о том, что тиокол марки 1 не полностью совмещается с эпоксидной составляющей и его избыток выделяется с образованием анизотропных структур. Введение Лапроксида АФ в предыдущую композицию приводит к изменению фазовой структуры (рис. 3).

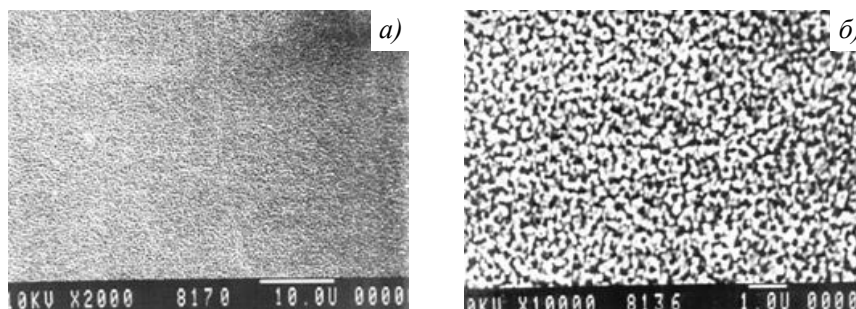


Рис. 3. Общий вид двухфазной структуры (*a* – $\times 2000$) и микрофазовая структура (*b* – $\times 10000$) лаковой композиции Э-41 + тиокол 1 + Лапроксид АФ + АСОТ-2

Процесс формирования структуры этой композиции проходит с разделением на фазы (рис. 3, *a*), которые имеют округлую форму, а их размеры находятся в диапазоне 50–100 мкм. Игольчатая структура в данной композиции отсутствует, а размеры дисперсных частиц составляют 0,1–0,3 мкм, т. е. меньше, чем в немодифицированной эпоксидной композиции. Можно предположить, что введение в эпоксидно-тиоколовые композиции Лапроксида АФ приводит к улучшению фазовой структуры, уменьшению размера дисперсных частиц и снижению пористости.

Исследована фазовая структура аналогичных эпоксидных композиций, отверждаемых низкомолекулярным полиамидом ПО-200.

Отверждение эпоксидной композиции низкомолекулярным полиамидом приводит к образованию неоднородной фазовой структуры (рис. 4), в которой содержатся включения с размерами до 10 мкм. Эта композиция имеет неоднородное строение и содержит многочисленные области с микровключениями размером до ~1 мкм.

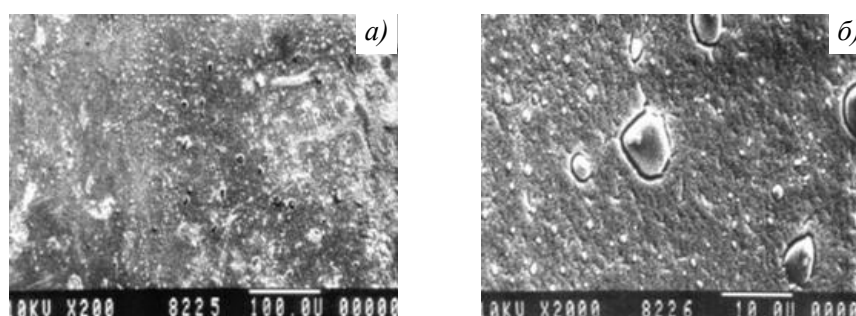


Рис. 4. Общий вид (*a* – $\times 200$) и фазовая структура границы между фазами (*b* – $\times 2000$) лаковой композиции Э-41 + ПО-200

Использование в эпоксидно-полиамидной композиции в качестве модификатора полисульфидного каучука сопровождается образованием неоднородной фазовой структуры и ее расслоением на округлые области с размерами от 50 до 200 мкм (рис. 5). Кроме того, в этой композиции появляются поры диаметром от 0,5 до 1,0 мкм.

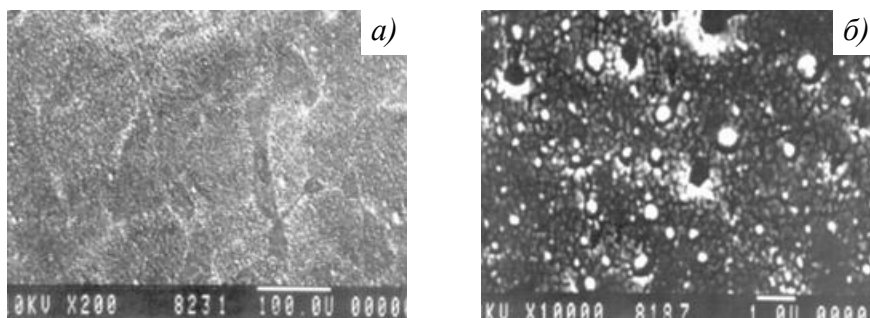


Рис. 5. Общий вид (*a* – $\times 200$) и включения и поры в микрофазовой структуре (*б* – $\times 10000$) лаковой композиции Э-41 + тиокол 1 + ПО-200

Аналогичная структура наблюдается при введении в эпоксидно-полиамидную композицию, содержащую в качестве модификатора полисульфидный каучук, Лапроксида АФ (рис. 6). Процесс структурообразования этой композиции также сопровождается образованием неоднородной фазовой структуры и ее расслоением. В структуре этой композиции также появляются поры и содержание этих пор существенно больше, чем в композиции без Лапроксида АФ.

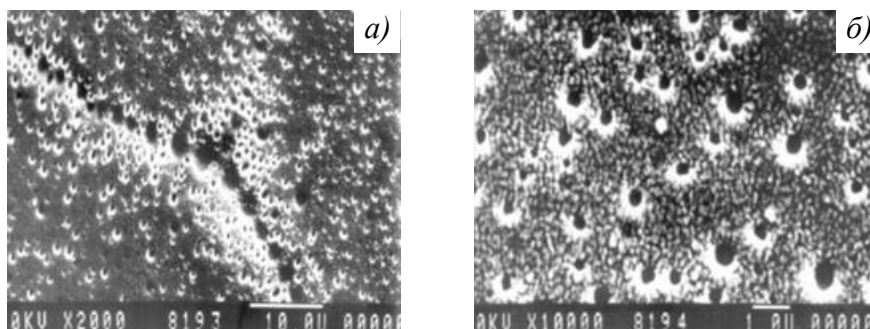


Рис. 6. Граница между фазами (*a* – $\times 2000$) и микрофазовая структура с порами (*б* – $\times 10000$) лаковой композиции Э-41 + тиокол 1 + Лапроксид АФ + ПО-200

Проведенные исследования фазовой структуры отвержденных эпоксидных композиций показали, что на процесс структурообразования ненаполненных эпоксидных композиций оказывает влияние каждый компонент полимерной системы. Однако наибольшее влияние на структурообразование исследованных полимерных систем оказывает химическая природа аминного отвердителя.

При использовании кремнийорганического амина для отверждения эпоксидных композиций образуется однородная структура, состоящая из частиц мелкодисперсной фазы, равномерно распределенной в дисперсионной среде; дефекты в виде пор и микротрещин не обнаружены. Введение модификаторов в эпоксидную композицию приводит к изменению фазовой структуры. Игольчатая структура, которая образуется при введении тиокола марки 1, в данной композиции отсутствует, а размеры дисперсных частиц меньше, чем в немодифицированной эпоксидной композиции. Можно предположить, что введение в эпоксидно-тиоколовые композиции Лапроксида АФ приводит к улучшению фазовой структуры, уменьшению размера дисперсных частиц, снижению пористости.

При использовании низкомолекулярного полиамида ПО-200 в качестве отвердителя образуются структуры, которые имеют неоднородное строение и содержат многочисленные микровключения. Введение в эпоксидно-полиамидную композицию

модификаторов приводит к образованию еще более неоднородной фазовой структуры и ее расслоению, а также появлению пор, что отрицательно влияет на адгезию и водостойкость отвержденных покрытий.

Исследованы адгезия и физико-механические свойства ненаполненных лаковых покрытий на основе исследуемых эпоксидных композиций. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения адгезии и физико-механических свойств покрытий на основе ненаполненных модифицированных полимерных композиций

Полимерная композиция	Толщина, мкм	Адгезия, балл		Физико-механические свойства	
		в исходном состоянии	после 7 сут увлажнения	прочность при ударе, Дж	прочность при растяжении, мм
Э-41 + ПО-200	32–38	2	3	5	6,6
Э-41 + тиокол + ПО-200	35–40	2	3	5	6,5
Э-41 + тиокол + Лапроксид АФ + ПО-200	36–42	2	2	5	6,3
Э-41 + АСОТ-2	34–38	1	1	5	4,0
Э-41 + тиокол + АСОТ-2	35–40	1	1	5	5,9
Э-41 + тиокол + Лапроксид АФ + АСОТ-2	30–40	1	1	5	5,6

Из полученных результатов следует, что применение модифицирующих компонентов в композициях, отвержденных кремнийорганическим амином АСОТ-2, повышает адгезию покрытия до 1 балла как в исходном состоянии, так и после 7 сут воздействия дистиллированной воды, а также способствует повышению прочности покрытия при растяжении, которая характеризует эластичность, – на 40–47 %.

Введение модификаторов (тиокола марки 1 и Лапроксида АФ) в композиции, отвержденные низкомолекулярным полиамидом ПО-200, не приводит к существенному улучшению адгезии, а также физико-механических свойств.

Исследована кинетика водопоглощения лаковых покрытий на основе эпоксидных композиций, отвержденных кремнийорганическим амином АСОТ-2 и низкомолекулярным полиамидом ПО-200, после испытаний в дистиллированной воде в течение 30 сут. Результаты определения водопоглощения представлены на рис. 7 и 8.

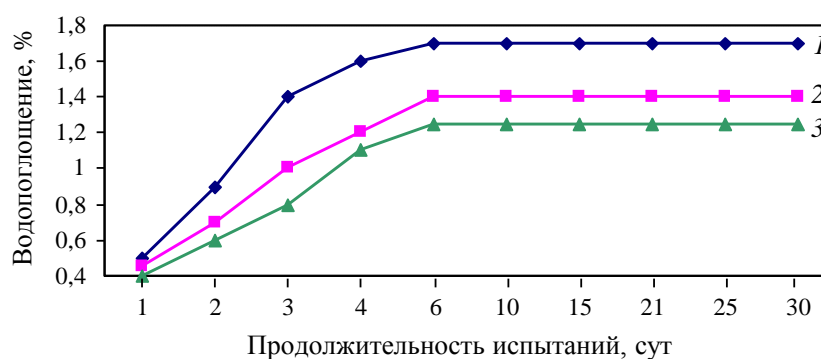


Рис. 7. Кинетика водопоглощения лаковых покрытий на основе эпоксидных композиций Э-41, отвержденных кремнийорганическим амином АСОТ-2 (1) с тиоколом марки 1 (2) и тиоколом марки 1 + Лапроксид АФ (3)

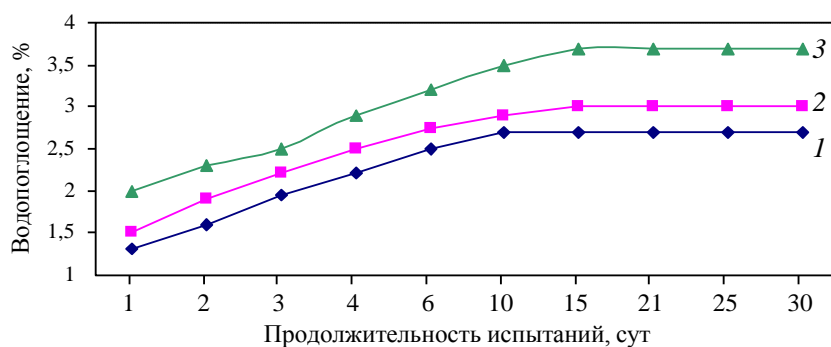


Рис. 8. Кинетика водопоглощения лаковых покрытий на основе эпоксидных композиций Э-41, отвержденных кремнийорганическим амином ПО-200 (1) с тиоколом марки 1 (2) и тиоколом марки 1 + Лапроксид АФ (3)

Из приведенных кинетических кривых водопоглощения видно, что при контакте покрытий с дистиллированной водой происходит поглощение воды пленкой покрытия за счет сорбционных процессов, происходящих в пленке (рис. 7 и 8). Для покрытий, отвержденных кремнийорганическим амином (рис. 7), достижение равновесной сорбции для всех покрытий достигается на 6 сут испытаний. Следует отметить, что наименьшее значение влагопоглощения наблюдается для многокомпонентной композиции Э-41 + тиокол марки 1 + Лапроксид АФ, отвержденной кремнийорганическим амином АСОТ-2. Среднее значение водопоглощения составляет 1,25 %. Максимальное значение водопоглощения у покрытия на основе композиции Э-41 + АСОТ-2 не превышает 1,7 %.

Для покрытий, отвержденных низкомолекулярным полиамидом ПО-200 (рис. 8) достижение равновесной сорбции для всех покрытий достигается за различные временные промежутки. Равновесная сорбция для покрытий, полученных на основе композиции Э-41 + ПО-200, достигается на 10 сут испытаний, при этом среднее значение водопоглощения составляет 2,7 %. Для покрытий на основе эпоксидных композиций, модифицированных тиоколом марки 1 и Лапроксидом АФ, равновесная сорбция достигается на 15 сут испытаний. Среднее значение водопоглощения составляет: 3,0 % – для покрытия на основе композиции Э-41 + тиокол марки 1 + ПО-200; 3,9 % – для покрытия на основе композиции Э-41 + тиокол марки 1 + Лапроксид АФ + ПО-200.

Полученные результаты исследования свойств лаковых покрытий коррелируют с результатами исследований фазовой структуры покрытий, полученных на основе модифицированных и немодифицированных эпоксидных композиций, отвержденных кремнийорганическим амином АСОТ-2 и низкомолекулярным полиамидом ПО-200.

Наиболее высокими адгезионными, физико-механическими и влагозащитными свойствами обладают лаковые покрытия, отвержденные кремнийорганическим амином АСОТ-2. Введение в эпоксидно-тиоколовые композиции Лапроксида АФ приводит к улучшению фазовой структуры, уменьшению размера дисперсных частиц, снижению пористости. Вероятно, это связано с тем, что Лапроксид АФ, содержащий эпоксидные группы, принимает участие в процессе отверждения покрытия. Введение модификаторов в эпоксидные композиции, отвержденные низкомолекулярным полиамидом ПО-200, не приводит к существенному повышению адгезии покрытий и улучшению физико-механических свойств, а также водостойкости.

Заключения

Изготовлены полимерные композиции на основе эпоксидного пленкообразующего, модифицированного жидким тиоколом марки 1 и Лапроксидом АФ.

Исследована фазовая структура лаковых покрытий на основе эпоксидных композиций. Установлено, что на процесс структурообразования ненаполненных эпоксидных композиций существенное влияние оказывает каждый компонент полимерной системы. Наибольшее влияние на процесс структурообразования исследованных полимерных систем оказывает химическая природа аминного отвердителя. При использовании кремнийорганического амина для отверждения эпоксидных композиций образуется однородная структура, состоящая из частиц мелкодисперсной фазы, равномерно распределенной в дисперсионной среде; дефекты в виде пор, микротрещин не обнаружены.

При использовании низкомолекулярного полиамида ПО-200 в качестве отвердителя образуются структуры, которые имеют неоднородное строение и содержат многочисленные микровключения. Введение в эпоксидно-полиамидную композицию модификаторов приводит к образованию еще более неоднородной фазовой структуры с ее расслоением, а также появлению пор, что отрицательно влияет на адгезию и водостойкость отвержденных покрытий.

Определены значения адгезии и физико-механических свойств ненаполненных лаковых покрытий на основе исследуемых эпоксидных композиций. Установлено, что применение модифицирующих компонентов в композициях, отвержденных кремнийорганическим амином АСОТ-2, повышает адгезию покрытия, а также прочность покрытия при растяжении.

Исследована кинетика водопоглощения лаковых покрытий на основе эпоксидных композиций, отвержденных кремнийорганическим амином АСОТ-2 и низкомолекулярным полиамидом ПО-200, после испытаний в дистиллированной воде в течение 30 сут. Показано, что наименьшее значение влагопоглощения наблюдается для многокомпонентной композиции Э-41 + тиokol марки 1 + Лапроксид АФ, отвержденной кремнийорганическим амином АСОТ-2.

Полученные результаты определения адгезии, физико-механических свойств и водостойкости коррелируют с результатами исследований фазовой структуры покрытий, полученных на основе модифицированных и немодифицированных эпоксидных композиций, отвержденных кремнийорганическим амином АСОТ-2 и низкомолекулярным полиамидом ПО-200.

Таким образом, эпоксидное пленкообразующее, содержащее в качестве модификаторов тиokol марки 1 и Лапроксид АФ, может быть использовано при разработке антикоррозионных и водостойких грунтовок для защиты алюминиевых сплавов.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. *Авиационное материаловедение: итоги и перспективы* // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. № 1. С. 3–12.
2. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
3. Житомирский Г.И. *Конструкция самолетов*. М.: Машиностроение, 1991. 400 с.
4. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
5. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хвацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
6. Павлюк Б.Ф. Основные направления в области разработки полимерных функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392.

7. Чеботаревский В.В., Кондрашов Э.К. Технология лакокрасочных покрытий в машиностроении. М.: Машиностроение, 1978. 295 с.
8. Семенова Л.В., Нефедов Н.И., Белова М.В., Лаптев А.Б. Системы лакокрасочных покрытий для вертолетной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 4 (49). С. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
9. Квасников М.Ю., Замшин В.А., Кудло В.Л., Ильина Н.С., Чинов В.В., Непочатов В.М. Новая технология получения электрофоретического покрытия на деталях вертолета, эксплуатирующихся в условиях фреттинг-коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 49–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-49-55.
10. Железняк В.Г. Современные лакокрасочные материалы для применения в изделиях авиационной техники // *Труды ВИАМ*. 2019. № 5 (77). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.01.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
11. Яковлев А.Д., Яковлев С.А. Лакокрасочные покрытия функционального назначения. СПб.: Химиздат, 2016. 272 с.
12. Кочнова З.А., Сорокин М.Ф., Захарова А.А., Черобыло И.А. Покрытия с повышенной адгезией к анодированному алюминию и его сплавам // *Лакокрасочные покрытия и их применение*. 1980. № 4. С. 32–34.
13. Кондрашов Э.К., Кузнецова В.А., Семенова Л.В., Лебедева Т.А., Малова Н.Е. Развитие авиационных лакокрасочных материалов // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2012. № 5. С. 49–54.
14. Филичкина В.Н. Современное состояние и тенденции развития производства и потребления эпоксидных смол. М.: НИИТЭХИМ, 1988. Вып. 8. 18 с.
15. Мошинский Л.Я. Эпоксидные смолы и отвердители (структура, свойства, химия и топология отверждения). Тель-Авив, 1995. 370 с.
16. Мостовой А.С., Панова Л.Г. Исследование возможности использования низкомолекулярного полиамида марки ПО-300 в качестве отвердителя «холодного» отверждения для эпоксидных олигомеров // *Пластические массы*. 2016. № 1–2. С. 16–18.
17. Носков А.М., Новиков Н.И. Отверждение глицидиловых эфиров аминами в присутствии гидроксильных групп // *Журнал прикладной химии*. 2008. Т. LW. № 12. С. 2733–2737.
18. Петров Г.Н., Синайский А.Г., Дальгрэн И.В. Жидкие углеводородные каучуки и области их применения // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2009. № 10. С. 24–27.
19. Юловская В.Д. Олигомеры. Каучук-олигомерные композиции, структура и свойства: учеб. пособие. М.: Моск. гос. акад. тонкой хим. технологии им. М.В. Ломоносова, 2008. 46 с.
20. Чалых А.Е., Кочнова З.А., Жаворонок Е.С. Совместимость и диффузия в системах эпоксидные олигомеры–жидкие карбоксилатные каучуки // *Высокомолекулярные соединения*. Сер. А. 2001. Т. 43. № 12. С. 2147–2155.
21. Каблов В.Ф. Системная технология каучук-олигомерных композиций // *Олигомеры-2009*. М., 2009. С. 162–191.
22. Кондрашов Э.К., Кузнецова В.А., Семенова Л.В., Лебедева Т.А. Основные направления повышения эксплуатационных, технологических и экологических характеристик лакокрасочных покрытий для авиационной техники // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. № 1. С. 96–102.
23. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
24. Пыриков А.В., Лойко Д.П., Кочергин Ю.С. Модификация эпоксидных смол жидкими полисульфидными и карбоксилатными бутадиеновыми каучуками // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2010. № 1. С. 28–33.
25. Кузнецова В.А., Марченко С.А., Железняк В.Г., Емельянов В.В. Влияние пространственной структуры армирующего наполнителя на свойства лакокрасочных покрытий // *Труды ВИАМ*. 2020. № 9 (91). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-96-104.