

УДК 629.7.023.222

В.А. Кузнецова¹, С.А. Марченко¹, В.В. Емельянов¹, В.Г. Железняк¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ
ЭПОКСИДНЫХ ОЛИГОМЕРОВ И ОТВЕРДИТЕЛЕЙ
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Проведены исследования лаковых покрытий, изготовленных на основе эпоксидных олигомеров различной молекулярной массы, отвержденных отвердителями аминного типа. Исследованы термостойкость, эрозионная стойкость, прочностные и деформационные характеристики свободных лаковых пленок, а также их физико-механические свойства. Установлено, что на свойства эпоксидных лаковых покрытий существенное влияние оказывают молекулярная масса олигомера и химическая природа отвердителя, используемых для получения покрытий. Показано, что с увеличением молекулярной массы используемых для получения покрытий эпоксидных олигомеров происходит повышение их эксплуатационных свойств, таких как термостойкость, эрозионная стойкость, физико-механические свойства.

Ключевые слова: эпоксидные олигомеры, отвердители, эрозионная стойкость, термостойкость, адгезия, прочность при разрыве, относительное удлинение, прочность при ударе.

V.A. Kuznetsova¹, S.A. Marchenko¹, V.V. Emelyanov¹, V.G. Zheleznyak¹**STUDY OF THE INFLUENCE OF MOLECULAR MASS OF EPOXY
OLIGOMERS AND HARDENERS ON THE OPERATIONAL
PROPERTIES OF PAINT COATINGS**

The paper provides the results of studies of lacquer coatings made on the basis of epoxy oligomers of different molecular mass hardened by the amine type hardeners. Thermal resistance, erosion resistance, strength and deformation characteristics of free lacquer films, as well as their physical and mechanical properties have been examined. It has been determined that the properties of epoxy lacquer coatings are significantly influenced by the molecular mass of the oligomer and hardener used to produce these coatings. It is shown that with the increase in the molecular mass used to obtain coatings epoxy oligomers improve their operational properties, such as heat resistance, erosion resistance, physical and mechanical properties.

Keywords: epoxy oligomers, hardeners, erosion resistance, heat resistance, adhesion, strength at rupture, relative elongation, strength on impact.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Для защиты конструкций, изготовленных из металлических и неметаллических материалов, эксплуатирующихся в условиях эрозионного воздействия (снега, песка, капель дождя), высоких температур, влажности, коррозионно-активной среды и т. д., повсеместно применяются эрозионностойкие покрытия.

Поскольку воздействие вышеприведенных факторов может привести к появлению очагов коррозии, уменьшающих сопротивление усталости металла либо, в случае

полимерных композиционных материалов, снижающих конструкционную прочность изделий, крайне необходимо применение эрозионностойких покрытий, так как они позволяют обеспечить заданный ресурс работы защищаемых конструкций [1–6].

В процессе эксплуатации авиационной техники эрозионный износ наблюдается при воздействии однофазного или двухфазного высокоскоростного потока (газоабразивное и газокapельное изнашивание) на внешние поверхности антенных обтекателей, лопаток компрессора, лопастей винтов, а также на лобовые поверхности крыльев и оперения.

В ранее опубликованных работах показано, что эрозионная стойкость лакокрасочных покрытий (ЛКП) определяется прочностью и эластичностью полимерной матрицы. Это обеспечивает способность покрытия выдерживать ударно-абразивное воздействие твердых или жидких частиц без существенного ухудшения физико-механических и защитных свойств [7–12].

Для обеспечения надежной защиты конструкции с использованием эрозионностойких ЛКП необходимо наличие прочного адгезионного взаимодействия их с защищаемой поверхностью. Именно благодаря высокой адгезии удается существенно повысить ресурс работы ЛКП при эксплуатации. На величину адгезии покрытия к подложке в первую очередь влияет природа полимера и материал подложки, а также условия формирования покрытия. Наиболее высокая адгезионная прочность достигается у покрытий, формируемых из олигомерных пленкообразователей, превращаемых в трехмерное состояние непосредственно на подложках [13, 14].

Адгезия ЛКП к подложке повышается по мере увеличения в эпоксидном олигомере количества полярных функциональных групп –ОН и –СООН, число которых в свою очередь зависит от молекулярной массы эпоксидного олигомера и отвердителя [15–18].

Данная работа посвящена исследованию влияния молекулярной массы эпоксидных пленкообразующих, отверждаемых отвердителями аминного типа, на основные эксплуатационные свойства защитных ЛКП. Известно, что полимерное пленкообразующее для создания ЛКП является основным компонентом, который обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики, поэтому от выбора полимерной матрицы зависят основные эксплуатационные свойства ЛКП [19].

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») [20].

Материалы и методы

Лакокрасочные материалы на основе эпоксидных пленкообразующих применяются для разработки защитных покрытий ответственного назначения. Их характеризует высокая прочность сцепления с металлической поверхностью, высокая водостойкость, а также устойчивость к агрессивным жидкостям, низкая пористость, достаточно высокие прочность и твердость покрытий [21–30].

В качестве объектов исследования выбраны диановые эпоксидные пленкообразующие, отличающиеся молекулярной массой, основные характеристики которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики исследуемых эпоксидных олигомеров

Эпоксидный олигомер	Молекулярная масса, а. е. м.	Эпоксидное число, %	Температура размягчения, °С
ЭД-20	~(360–470)	18–22	–
Э-41	~(900–1100)	9,0–12,0	72–82
Э-49	~2500	2,0–4,5	95–105

Для отверждения вышеуказанных эпоксидных олигомеров выбраны отвердители аминного типа:

- гексаметилендиамин (ГМД) с молекулярной массой ~116 а. е. м.;
- полиаминоамид (низкомолекулярный полиамид ПО-300) с молекулярной массой ~2800 а. е. м.

Для получения свободных пленок и лаковых покрытий эпоксидные смолы (пленкообразующие), а также полиаминоамид ПО-300, использовали в виде растворов в смеси органических растворителей. Для определения адгезии, прочности при ударе, эластичности при изгибе, устойчивости к эрозии изготовили пластины из сплава ВД17 толщиной 2 мм с гидropескоструйной подготовкой поверхности. Свободные пленки лаковых покрытий получали в соответствии с ГОСТ 14243–78. Толщина полученных покрытий составляла 95–110 мкм. Межслойную сушку лаковых покрытий и пленок осуществляли при температуре 100 °С в течение 3 ч. Для достижения максимально высокого уровня структурообразования использовали дополнительную термообработку покрытий при температуре 150 °С. Продолжительность термообработки составляла 5 ч.

Свойства отвержденных лаковых покрытий определяли с использованием следующих методик: прочность при ударе – по ГОСТ 4765–73; эластичность пленки покрытия при изгибе – по ГОСТ 31794–2012; адгезия покрытий – по ГОСТ 15140–78.

На основе отвержденных исследуемых композиций получены свободные пленки толщиной от 100 до 120 мкм для изучения их прочностных и деформационных характеристик.

Механические свойства свободных пленок определяли на разрывной машине в соответствии с ГОСТ 18299–72 при скорости нагружения образца 5 мм/мин. Свойства эпоксидных лаковых покрытий определяли в исходном состоянии и после термического воздействия при температуре 150 °С в течение 600 ч. Термостойкость покрытий оценивали термогравиметрическим методом по изменению весовых характеристик пленок покрытий (потери массы) после воздействия температуры, а также по изменению их стойкости к эрозии, адгезии, прочности при ударе, эластичности при изгибе. Стойкость покрытий к газоабразивной эрозии определяли в соответствии с СТП 1-595-9-110–84 на установке «Тайфун» центробежного типа при температуре 20 °С. С целью изучения влияния молекулярной массы на эрозионную стойкость покрытий выбрана скорость вращения ротора установки «Тайфун» 1000 об/мин.

Результаты и обсуждение

В работе изучено влияние молекулярной массы эпоксидных пленкообразующих (смол), отверждаемых отвердителями аминного типа, на термостойкость, стойкость к газоабразивной эрозии, адгезию к защищаемой поверхности и другие эксплуатационные характеристики лаковых покрытий.

В табл. 2 представлены результаты термогравиметрического анализа (потери массы) после искусственного старения при температуре 150 °С.

Таблица 2

Результаты определения уноса массы покрытия при термостарении

Состав полимерной композиции	Толщина покрытия, мкм	Потери массы, %, покрытия после термостарения при температуре 150 °С в течение, ч						
		50	100	200	300	400	500	600
Э-49+ГМД	95–100	0,4	0,97	1,9	2,4	3,1	3,7	3,9
Э-49+ПО-300	90–100	0,3	0,73	1,6	2,2	2,9	3,4	3,6
Э-41+ГМД	95–105	0,7	1,4	2,5	3,3	3,8	4,7	5,1
Э-41+ПО-300	90–100	0,6	1,1	2,2	2,8	3,5	4,3	4,5
ЭД-20+ГМД	95–110	1,1	1,95	3,4	4,1	4,8	5,2	5,5
ЭД-20+ПО-300	95–100	1	1,7	2,9	3,6	4,2	5	5,3

На рис. 1 представлена зависимость относительной потери массы эпоксидных лаковых покрытий с различными отвердителями. Из полученных результатов следует, что с увеличением продолжительности термостарения лаковых покрытий при температуре 150 °С наблюдается монотонное увеличение потери массы изучаемых покрытий, затем происходит снижение скорости потери массы, что может быть связано с образованием более устойчивых структур полимерной матрицы.

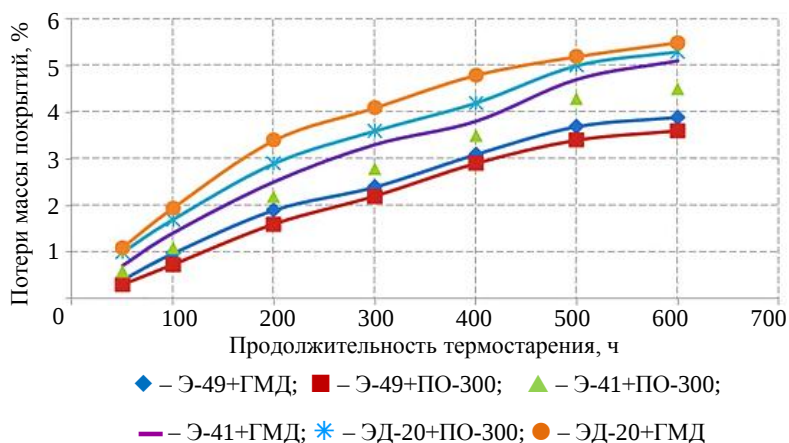


Рис. 1. Кинетика изменения весовых характеристик эпоксидных покрытий при термостарении при температуре 150 °С в течение 600 ч

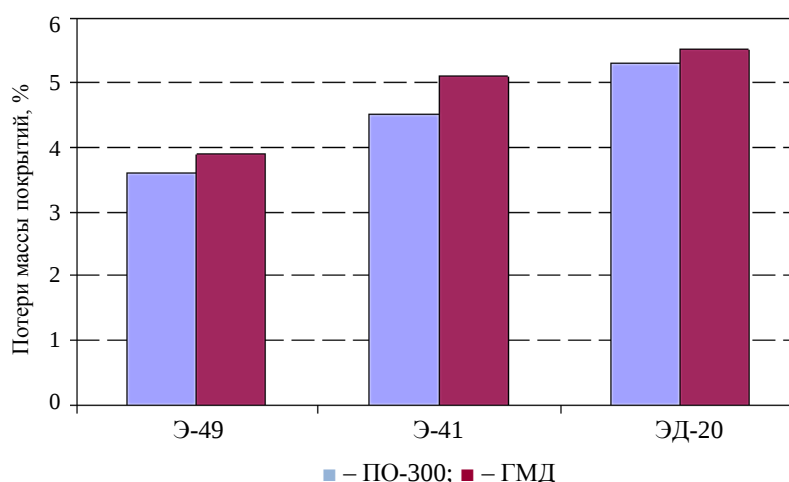


Рис. 2. Влияние молекулярной массы эпоксидного олигомера и отвердителя на термостойкость лаковых покрытий

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод, что потери массы исследуемых полимерных композиций зависят от молекулярной массы эпоксидного олигомера, а также от химической природы применяемого отвердителя (рис. 2). Наименьшие потери массы получены для покрытий на основе эпоксидного олигомера Э-49, средние значения 3,6% — для покрытий, отвержденных полиаминоамидом ПО-300, и 3,9% — для покрытий, отвержденных гексаметилендиаминном.

Наименее устойчивыми оказались покрытия на основе эпоксидного олигомера ЭД-20. Среднее значение потери массы для покрытий, отвержденных низкомолекулярным полиамидом, составляет 5,3%, а для покрытий, отвержденных гексаметилендиаминном, 5,5%.

Из результатов, представленных на рис. 1, также следует, что на термостойкость лаковых покрытий в гораздо большей степени оказывает влияние молекулярная масса эпоксидного олигомера, чем химическая природа отвердителя.

Исследовано влияние молекулярной массы эпоксидных олигомеров и отвердителей на стойкость к эрозии эпоксидных лаковых покрытий. На рис. 3 приведены результаты определения эрозионной стойкости покрытий при скорости вращения ротора 1000 об/мин. Видно, что на эрозионную стойкость полученных эпоксидных лаковых покрытий существенно влияет молекулярная масса использованного для получения покрытий пленкообразующего. Наиболее высокие значения эрозионной стойкости получены на лаковых покрытиях с использованием смолы Э-49.

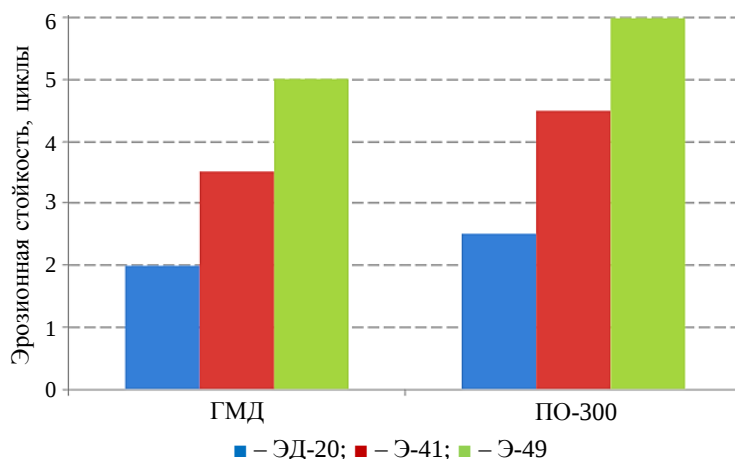


Рис. 3. Влияние молекулярной массы эпоксидного олигомера и отвердителя на эрозионную стойкость лаковых покрытий

При сравнении результатов, полученных при определении эрозионной стойкости лаковых покрытий на основе эпоксидных смол Э-49 и ЭД-20, отвержденных отвердителем ПО-300, видно, что эрозионная стойкость покрытия на основе олигомера Э-49 в 1,5 раза выше, чем у покрытия на основе олигомера ЭД-20.

Из данных, представленных на рис. 3, видно, что отвердитель также оказывает влияние на стойкость к эрозии исследуемых покрытий, но в меньшей степени, чем молекулярная масса эпоксидного олигомера. Повышение эрозионной стойкости лаковых покрытий ЭД-20 и Э-49, отвержденных отвердителем ПО-300, по сравнению с аналогичными покрытиями, полученными с применением ГМД, составляет 20%.

Большой интерес представляет изучение влияния молекулярной массы эпоксидного олигомера и химической природы отвердителя аминного типа на прочность и удлинение при разрыве (рис. 4). Из полученных результатов следует, что прочностные и деформационные характеристики свободных пленок при разрыве определяются как молекулярной массой эпоксидного олигомера, так и типом применяемого отвердителя. Это объясняется тем, что механические характеристики отвержденного олигомера зависят как от частоты пространственной сетки, так и от подвижности сегментов макромолекул. Из приведенных результатов также следует, что для использованных отвердителей прочность пленки при разрыве возрастает с увеличением молекулярной массы олигомера, а также увеличением степени «сшивки» при отверждении, т. е. частоты поперечных связей. Одновременно с возрастанием прочности пленки покрытия увеличивается и ее жесткость. Прочность при разрыве лаковых пленок, отвержденных отвердителем ГМД, выше, чем у аналогичных лаковых покрытий, отвержденных полиаминоамином ПО-300.

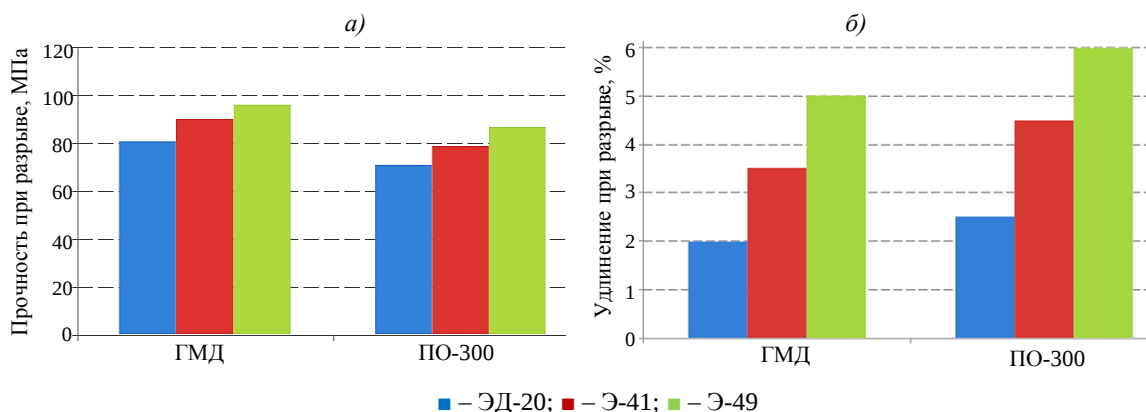


Рис. 4. Влияние молекулярной массы эпоксидного олигомера и отвердителя на прочность (а) и удлинение (б) при разрыве

Эластичность лаковых покрытий, характеризуемая удлинением при разрыве, монотонно возрастает с увеличением молекулярной массы эпоксидного олигомера. Химическое строение отвердителя также оказывает заметное влияние на удлинение при разрыве свободных пленок. Лаковые покрытия, отвержденные полиаминоамидом ПО-300, характеризуются более высокими значениями удлинения при разрыве, чем покрытия, отвержденные отвердителем ГМД. Это связано с тем, что при отверждении эпоксидных олигомеров низкомолекулярным полиамидом образуются структуры с более редкими сетками. За счет этого увеличивается сегментальная подвижность цепей макромолекул, приводящая к повышению эластичности. При отверждении эпоксидных олигомеров отвердителем ГМД образуется более жесткая сетка, поэтому удлинения при разрыве лаковых пленок на основе олигомера Э-49, отвержденных полиаминоамидом ПО-300, на 80% больше, чем у таких же лаковых пленок, отвержденных ГМД. Удлинения при разрыве лаковых пленок на основе эпоксидного олигомера ЭД-20, отвержденных ПО-300, на 52% больше, чем у аналогичных пленок, отвержденных ГМД.

Исследовано также влияние термостарения лаковых покрытий на основе эпоксидных олигомеров с различной молекулярной массой при температуре 150 °С в течение 500 ч на их эрозионную стойкость. Полученные результаты представлены на рис. 5. Видно, что термостарение покрытий также оказывает влияние на их эрозионную стойкость. Зависимость эрозионной стойкости исследуемых эпоксидных лаковых покрытий имеет ярко выраженный нелинейный характер. Наиболее высокие показатели эрозионной стойкости получены на лаковых покрытиях, изготовленных на основе эпоксидного олигомера Э-49, отвержденного низкомолекулярным полиамидом ПО-300. Из представленных на рис. 5 данных также видно, что первоначальное старение эпоксидных покрытий, отверждаемых низкомолекулярным полиамидом и гексаметилендиамином, при температуре 150 °С приводит к увеличению эрозионной стойкости. Это объясняется дальнейшим процессом структурообразования (сшивания) эпоксидной матрицы, а следовательно, возрастанием прочности полимера и, соответственно, эрозионной стойкости полученных на их основе покрытий. При более длительном старении у всех исследуемых покрытий, отверждаемых как ГМД, так и ПО-300, наблюдается тенденция к снижению эрозионной стойкости, особенно сильно это проявляется для случая отверждения ГМД. Это связано с протеканием деструктивных процессов в полимерном покрытии. Эти изменения обусловлены разрывом молекулярных связей при совместном воздействии температуры и кислорода воздуха, усиливающего процесс деструкции полимера (окислительная деструкция). При этом следует отметить, что наряду с деструкцией протекает процесс структурообразования, приводящий к образованию более устойчивых, менее эластичных и более жестких структур [31].

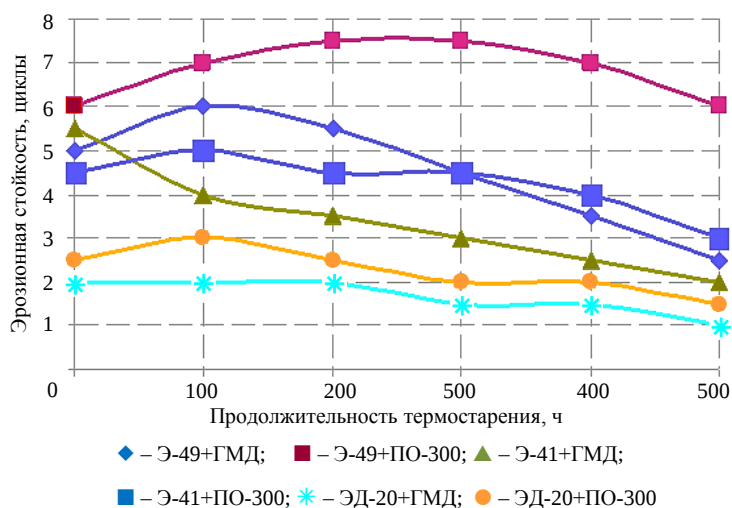


Рис. 5. Кинетика изменения эрозионной стойкости эпоксидных лаковых покрытий при термостарении при температуре 150 °C

В табл. 3 приведены результаты определения физико-механических свойств и эрозионной стойкости в исходном состоянии и после термостарения при температуре 150 °C в течение 500 ч.

Таблица 3

Свойства лаковых покрытий в исходном состоянии и после термостарения

Состав полимерной композиции	В исходном состоянии				После термостарения при 150 °C в течение 500 ч			
	Адгезия, балл	Прочность при ударе, Дж	Эластичность при изгибе, мм	Эрозионная стойкость, циклы	Адгезия, балл	Прочность при ударе, Дж	Эластичность при изгибе, мм	Эрозионная стойкость, циклы
Э-49+ПО-300	1	5	1	6,0	2	5	1	6,0
Э-49+ГМД	1	5	1	5,0	1	5	2	2,5
Э-41+ПО-300	1	5	1	4,5	2	4,5	3	3,0
Э-41+ГМД	1	5	1	3,5	1	4	3	2,0
ЭД-20+ПО-300	1	5	2	2,5	2	4	5	1,5
ЭД-20+ГМД	1	5	3	2,0	1	3	5	1,0

Из результатов, приведенных в табл. 3, видно, что молекулярная масса эпоксидного олигомера, а также использованный для формирования покрытий отвердитель оказывают существенное влияние на адгезию и физико-механические (прочность при ударе, эластичность при изгибе) свойства, эрозионную стойкость и термостойкость. Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- молекулярная масса оказывает существенное влияние на свойства лаковых покрытий;
- адгезия лаковых покрытий к поверхности алюминиевого сплава ВД17 с гидropескоструйной подготовкой поверхности в исходном состоянии для всех исследуемых композиций высокая (1 балл). Адгезия практически не зависит от молекулярной массы используемого олигомера, однако после термостарения наблюдается ее снижение для композиций, отвержденных гексаметилендиамином;
- длительное термостарение при температуре 150 °C в течение 500 ч приводит к снижению эксплуатационных свойств лаковых покрытий;
- наиболее высокими физико-механическими свойствами, эрозионной стойкостью и термостойкостью обладают лаковые композиции на основе эпоксидного олигомера Э-49, отвержденного низкомолекулярным полиамидом ПО-300.

Заключения

В ходе выполнения работы исследованы свойства лаковых покрытий на основе эпоксидных олигомеров ЭД-20, Э-41 и Э-49, отвержденных отвердителями аминного типа. Исследована термостойкость, эрозионная стойкость, прочностные и деформационные характеристики, а также физико-механические свойства.

Показано, что потери массы исследуемых полимерных композиций зависят от молекулярной массы эпоксидного олигомера, а также от использованного отвердителя.

Установлено, что на физико-механические свойства и эрозионную стойкость эпоксидных лаковых покрытий существенное влияние оказывает молекулярная масса олигомера и химическая природа отвердителя, используемых для получения покрытий.

С увеличением молекулярной массы используемых для получения покрытий эпоксидных олигомеров происходит повышение эрозионной стойкости и эластичности лаковых покрытий, а также термостойкости покрытий при термостарении при температуре 150 °С.

Наиболее высокими эксплуатационными свойствами (термостойкостью, физико-механическими свойствами, эрозионной стойкостью) обладают лаковые покрытия на основе эпоксидного олигомера Э-49 с молекулярной массой ~2500 а. е. м., отвержденные низкомолекулярным полиамидом ПО-300.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
2. Эрозия / под ред. Ю.В. Полежаева. М.: Мир, 1982. 464 с.
3. 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: 17.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
4. 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.
5. Проблемы защитных ЛКМ: обзор материалов европейской конференции «Защитные покрытия» («Protective coating») (Дюссельдорф, Германия, 2013) // Лакокрасочные материалы и их применение. 2013. №9. С. 33–35.
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. 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.
8. Кузнецова В.А., Шаповалов Г.Г. Тенденции развития в области эрозионностойких покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. №11 (71). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-74-85.
9. Кузнецова В.А., Железняк В.Г., Силаева А.А. Влияние механических характеристик грунтово-вочных покрытий на устойчивость систем эрозионностойких дисперсно-армированных покрытий к циклическим механическим нагрузкам // Труды ВИАМ. 2018. №6 (66). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.11.20). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-59-67.
10. Нефедов Н.И., Кондрашов Э.К., Семенова Л.В., Лебедева Т.А. Эрозионностойкие покрытия для защиты изделий из полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S3. С. 25–27. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-25-27.
11. 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.

12. Коврижкина Н.А., Кузнецова В.А., Силаева А.А., Марченко С.А. Способы улучшения свойств лакокрасочных покрытий с помощью введения различных наполнителей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. №4 (57). С. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
13. Зиновьев В.Е. К вопросу связи адгезии и качества поверхностного слоя субстрата клеевого соединения // *Вестник РГУПС*. 2010. №4. С. 5–9.
14. Яковлев А.Д. *Химия и технология лакокрасочных покрытий*. СПб.: Химиздат, 2008. 448 с.
15. Иванов А.А., Ботвин В.В., Филимошкин А.Г. Адгезионная прочность наполненных полиалюмосиликатов на алюминиевой поверхности // *Журнал прикладной химии*. 2014. Т. 87. №2. С. 158.
16. Иржак В.И., Розенберг Б.А., Ениколопан Н.С. *Сетчатые полимеры (синтез, структура, свойства)*. М.: Наука, 1979. 248 с.
17. Пестов А.В., Пузырев И.С., Мехаев А.В. и др. Модифицирование адгезивных материалов на основе эпоксидных олигомеров фторсодержащими органическими соединениями // *Журнал прикладной химии*. 2014. Т. 87. №4. С. 482.
18. Воюцкий С.С. *Адгезия* // *Энциклопедия полимеров*: в 3 т. М.: Сов. энциклопедия, 1972. Т. 1. С. 22–29.
19. Мошинский Л.Я. *Эпоксидные смолы и отвердители (структура, свойства, химия и топология отверждения)*. Тель-Авив, 1995. 370 с.
20. 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. С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
21. Филичкина В.Н. Современное состояние и тенденции развития производства и потребления эпоксидных смол // *Химическая промышленность за рубежом*. М.: НИИТЭХИМ, 1988. Вып. 8. С. 18.
22. Межиковский С.М. *Физико-химия реакционноспособных олигомеров*. М.: Наука, 1998. 233 с.
23. Лундин А.Е., Остапкович А.М., Юшкова Е.Ю. Кинетика отверждения эпоксидных смол аминами // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2005. Т. 48. №1. С. 73–75.
24. Кочнова З.А., Жаворонок Е.С., Чалых А.Е. *Эпоксидные смолы и отвердители: промышленные продукты*. М.: Пэйнт медиа, 2006. 200 с.
25. Еселев А.Д., Бобылев В.А. Эпоксидные смолы: вчера, сегодня, завтра // *Лакокрасочная промышленность*. 2009. №9. С. 15–17.
26. Зубкова З.А., Довгополик Т.А., Стецюк М.Ф., Георгица Т.А., Батог Е.А. Модифицированные аминные отвердители эпоксидных смол // *Пластические массы*. 2007. №3. С. 31–33.
27. Катнов В.Е., Степин С.Н. Исследование влияния отвердителя на химическую стойкость и защитные свойства эпоксидных покрытий // *Материалы научной сессии КГТУ (5–9 февр. 2008 г.)*. Казань, 2008. С. 34–35.
28. Скороходова О.Н., Казакова Е.Е. Новые разработки в области защитных ЛКМ // *Лакокрасочная промышленность*. 2017. №5. С. 14.
29. Ламбурн Р., Машляковский Л.Н., Фрост А.М. *Лакокрасочные материалы и покрытия. Теория и практика*. СПб.: Химия, 1991. 512 с.
30. Кузнецова В.А., Кузнецов Г.В., Шаповалов Г.Г. Исследование влияния молекулярной массы эпоксидной смолы на адгезионные, физико-механические свойства и эрозионную стойкость покрытий // *Труды ВИАМ*. 2014. №8. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.11.20). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-8-8.
31. Карякина М.И. *Физико-химические основы формирования и старения покрытий*. М.: Химия, 1980. 216 с.