

УДК 629.7.023.222

В.А. Кузнецова<sup>1</sup>, С.А. Марченко<sup>1</sup>, В.Г. Железняк<sup>1</sup>, В.В. Емельянов<sup>1</sup>

## ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ АРМИРУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА СВОЙСТВА ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-96-104

*Исследовано влияние пространственной структуры армирующих наполнителей нитевидных кристаллов оксида цинка ZnO и нитрида бора BN, а также их содержания в эпоксидно-полиамидной полимерной матрице на адгезию, физико-механические свойства, водопоглощение и эрозионную стойкость. Показано, что покрытия, содержащие в своем составе нитевидные кристаллы ZnO, представляющие собой четкие пространственные тетраэдры из четырех одиночных кристаллов, выходящих из единого центра, обладают более высокой эластичностью покрытия при растяжении, а также устойчивостью к эрозии по сравнению с аналогичными покрытиями, содержащими нитевидные кристаллы BN, имеющие игольчатую структуру.*

**Ключевые слова:** эпоксидный олигомер, армирующий наполнитель, нитевидные кристаллы, лакокрасочное покрытие, эрозионная стойкость, адгезия, эластичность, водопоглощение.

V.A. Kuznetsova<sup>1</sup>, S.A. Marchenko<sup>1</sup>, V.G. Zheleznyak<sup>1</sup>, V.V. Emelyanov<sup>1</sup>

## INFLUENCE OF THE SPATIAL STRUCTURE OF REINFORCING FILLERS ON THE PROPERTIES OF THE PAINT COATINGS

*The influence of the spatial structure of reinforcing fillers, such as ZnO and BN filamentous crystals of zinc oxide, as well as their content in an epoxy-polyamide polymer matrix on adhesion, physical and mechanical properties, water absorption and erosion resistance, was studied. It is shown that coatings containing ZnO filamentous crystals in their composition, which are clear spatial tetrahedra of four single crystals emerging from a single center, have a higher elastic coating under tension, as well as resistance to erosion compared to similar coatings containing BN filamentous crystals with a needle-like structure.*

**Keywords:** epoxy oligomer, reinforcing filler, filamentous crystals, paint coating, erosion resistance, adhesion, elasticity, water absorption.

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

Проблема защиты изделий авиационной техники, эксплуатирующейся в сложных условиях воздействия окружающей среды, является весьма актуальной. При взлете и посадке, а также во время полета летательные аппараты подвергаются интенсивному воздействию механических нагрузок, высокой влажности, УФ-облучению, термическим знакопеременным нагрузкам, эрозии и др.

Известно, что основным средством защиты авиационной техники, элементов конструкции летательных аппаратов и агрегатов от воздействия факторов внешней среды является правильный выбор системы лакокрасочного покрытия и подготовки поверхности с учетом конструктивных особенностей детали, узла и агрегата, а также условий эксплуатации и других факторов. Наиболее высокие требования предъявляются к покрытиям, предназначенным для защиты лобовых кромок крыла, лопастей

воздушных винтов самолетов и вертолетов, лопаток компрессора ГТД и агрегатов и деталей, которые подвергаются интенсивному эрозионному воздействию [1–4].

Следует отметить, что для обеспечения надежной защиты конструкции с использованием эрозионностойких покрытий необходимо наличие прочного адгезионного взаимодействия их с защищаемой поверхностью. Именно благодаря высокой адгезии удается существенно повысить ресурс лакокрасочного покрытия при эксплуатации [5–10].

Известно, что эпоксидные олигомеры находят широкое применение в качестве полимерной основы для покрытий, поскольку обладают высокой адгезией к металлическим и неметаллическим поверхностям, стойкостью к действию воды, щелочей, кислот, а также обладают невысокой пористостью, низким показателем влагопоглощения и др. [11–13].

Адгезия покрытия к защищаемой поверхности, прежде всего, зависит от природы полимера, подложки, а также от условий формирования покрытия. Адгезионное взаимодействие лакокрасочного покрытия с поверхностью возрастает с увеличением в эпоксидном олигомере количества полярных функциональных групп, таких как –ОН, –СООН, которое зависит от молекулярной массы эпоксидного олигомера, а также отвердителя, используемого для получения покрытия [14, 15].

Для улучшения эксплуатационных и технологических свойств эпоксидных покрытий применяют различные модификаторы полимерной матрицы для повышения эластичности, твердости, термостойкости и эрозионной стойкости покрытий. В качестве модификаторов эпоксидных олигомеров часто используют низкомолекулярные жидкие каучуки, различные пластификаторы и другие соединения, позволяющие повысить те или иные свойства полимерного покрытия [16].

Следует отметить, что существенное влияние на свойства лакокрасочных покрытий, в том числе эрозионностойких, оказывает выбор наполнителя, а также определение его оптимального содержания в полимерном пленкообразующем. Полимерные композиции, наполненные дисперсными минеральными наполнителями, представляют собой гетерогенную систему с высокоразвитой поверхностью раздела фаз. Одним из основных процессов, определяющих свойства наполненных полимерных систем, является адгезия полимерного пленкообразующего к твердым поверхностям, т. е. адсорбция полимеров на поверхности дисперсной фазы наполнителя [17, 18].

В зависимости от природы и структуры наполнителя и полимерного пленкообразующего интенсивность адсорбционных процессов может быть различной. В связи с этим существует условное разделение наполнителей на активные (усиливающие), которые повышают физико-механические и прочностные свойства, и неактивные, введение которых приводит к улучшению технологических свойств лакокрасочного материала, созданию определенных цветовых характеристик покрытия и др. К усиливающим можно отнести наполнители, способствующие структурообразованию.

Основными условиями упрочнения полимера путем введения усиливающих наполнителей являются:

- применение наполнителей, способствующих структурообразованию полимера;
- введение в полимер армирующих наполнителей, обладающих собственной структурой и высокой прочностью.

Существенным фактором упрочнения (повышение прочностных характеристик) полимерной композиции является структура поверхностных или граничных слоев в наполненных полимерах [19–21].

К усиливающим наполнителям, применяемым в лакокрасочных материалах, можно отнести мелкодисперсные армирующие наполнители, так как они обладают собственной нитевидной структурой [22]. Вполне возможно, что форма армирующего наполнителя может способствовать структурообразованию пленки покрытия.

Данная работа посвящена исследованию свойств дисперсно-армированных лакокрасочных покрытий, полученных на основе эпоксидных пленкообразующих.

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

Для выяснения влияния пространственной структуры дисперсно-армирующих наполнителей на эксплуатационные свойства лакокрасочных покрытий, полученных на основе эпоксидных олигомеров, выбраны мелкодисперсные наполнители (рис. 1):

– нитевидные кристаллы оксида цинка (ZnO н.к.), которые представляют собой четкие пространственные тетраэдры из четырех одиночных кристаллов, выходящих из единого центра;

– нитевидные кристаллы нитрида бора (BN н.к.), которые имеют игольчатую, волокнистую структуру.

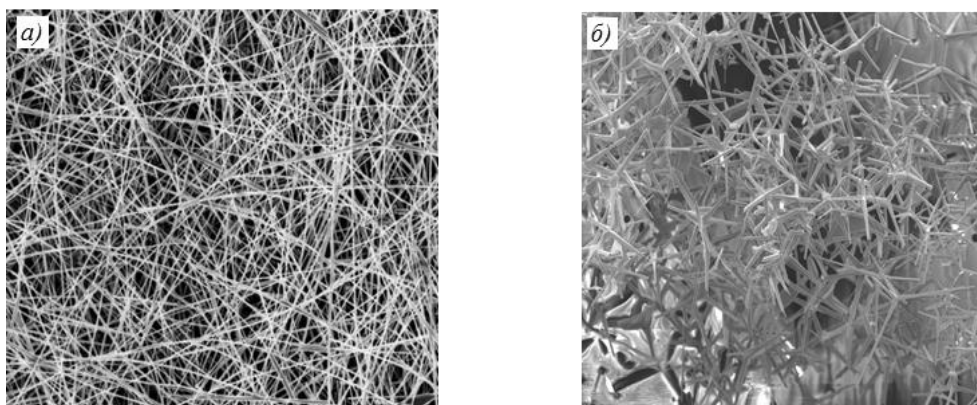


Рис. 1. Внешний вид нитевидных кристаллов нитрида бора (а) и оксида цинка (б)

На основании ранее проведенных исследований в качестве объекта исследований выбран диановый эпоксидный олигомер с молекулярной массой  $\sim(900-1100)$ , отверждаемый низкомолекулярным полиамидом ПО-200 [24].

Качество покрытий оценивали с помощью стандартных методик: адгезию покрытий определяли по ГОСТ 15140–78; прочность при ударе – по ГОСТ 4765–73 на приборе У-1А; эластичность при растяжении – по ГОСТ 29309–2007 на приборе пресс Эриксона.

Основными показателями, определяющими работоспособность эрозионностойких покрытий, наряду с адгезией и физико-механическими свойствами являются также эрозионная стойкость, термостойкость и влагостойкость.

Адгезию покрытий к углепластику и алюминиевому сплаву оценивали методом параллельных надразов в сухом состоянии и после увлажнения в течение 7 сут.

Водопоглощение покрытий определяли на образцах из алюминиевой фольги толщиной 150 мкм в соответствии с ГОСТ 21513–76 после выдержки образцов с покрытием в воде в течение 30 сут по формуле

$$B=100\% \cdot (m_2 - m_1) / m_1,$$

где  $B$  – водостойкость;  $m_1$ ,  $m_2$  – масса покрытия соответственно до и после выдержки в воде.

Эрозионную стойкость определяли в соответствии с СТП 1-595-9-110–84 на установке «Тайфун» центробежного типа при скорости вращения ротора 2000 об/мин.

Критерием оценки эрозионной стойкости является количество абразива, необходимого для разрушения лакокрасочного покрытия до подложки. Количество абразива измеряли в циклах (1 цикл соответствует воздействию 0,8 кг абразива Вольского месторождения с дисперсностью частиц 0,5–0,8 мм). Испытания проводили при комнатной температуре.

### Результаты и обсуждение

Одним из известных направлений модификации полимерных композиций является введение в полимерные смеси наполнителей, поскольку они оказывают существенное влияние на комплекс эксплуатационных свойств покрытий [25–29].

Для проведения исследований влияния пространственной структуры (формы) армирующего наполнителя на основные эксплуатационные свойства эпоксидно-полиамидных полимерных композиций изготовлены наполненные нитевидными кристаллами композиции путем диспергирования наполнителей в растворе эпоксидного олигомера на бисерной мельнице. Наполнители вводили в количестве от 5 до 25% (по массе). Наполненные полимерные композиции методом пневматического распыления наносили на образцы из углепластика и алюминиевого сплава 1163, подвергнутых обдужке корундом. Сушку покрытий проводили при температуре 100 °С в течение 2 ч, после чего исследовали свойства полученных покрытий. Результаты определения адгезии и физико-механических свойств наполненных эпоксидно-полиамидных композиций приведены в таблице.

**Результаты определения адгезии и физико-механических свойств наполненных покрытий**

Наполнитель	Концентрация, % (по массе)	Толщина покрытий, мкм	Адгезия, балл				Прочность при ударе, см (Дж)	Эластичность при растяжении, мм
			к углепластику (зашкуреному)		к сплаву 1163 (обдужка корундом)			
			в исходном состоянии	после 7 сут увлажнения	в исходном состоянии	после 7 сут увлажнения		
ZnO н.к.	5	120–130	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	50 (5,0)	6,5
	10		1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	50 (5,0)	6,0
	15		1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	50 (5,0)	5,4
	20		1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	50 (5,0)	5,2
	25		2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	50 (5,0)	5,0
BN н.к.	5	120–130	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	50 (5,0)	3,5
	10		1 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	50 (5,0)	3,2
	15		1 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	50 (5,0)	2,8
	20		1 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	50 (5,0)	2,5
	25		1 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	50 (5,0)	2,0

Из представленных результатов следует, что структура наполнителя и его количество в полимерной матрице влияет на адгезию и физико-механические свойства покрытий. Увеличение концентрации армирующего наполнителя ZnO н.к. в пределах от 5 до 20% (по массе) не приводит к существенному снижению адгезии к углепластику и сплаву 1163 как в исходном состоянии, так и после 7 сут увлажнения и составляет балл 1<sub>1</sub>. Дальнейшее увеличение содержания армирующего наполнителя до 25% (по массе) снижает адгезию до балла 2<sub>1</sub> как в исходном состоянии, так и после 7 сут увлажнения. Следует отметить, что применение в качестве армирующего наполнителя BN н.к. в количестве 5% (по массе) не приводит к снижению адгезии наполненного покрытия к защищаемой поверхности и составляет балл 1<sub>1</sub> как в исходном состоянии, так и после увлажнения в течение 7 сут. Дальнейшее увеличение содержания армирующего наполнителя в эпоксидно-полиамидной полимерной матрице практически не влияет на исходную адгезию, но приводит к снижению адгезии после 7 сут увлажнения до балла 2<sub>1</sub>.

Повышение концентрации армирующего наполнителя в полимерной матрице не снижает прочности покрытий при ударе (5,0 Дж), однако приводит к снижению эластичности при растяжении (рис. 2). Видно, что увеличение содержания армирующего наполнителя приводит к монотонному снижению эластичности при растяжении, причем существенное влияние на эластичность покрытий, содержащих армирующий наполнитель, оказывает его пространственная структура. Увеличение содержания нитевидных кристаллов ZnO в эпоксидно-полиамидной полимерной матрице с 5 до 25% (по массе) приводит к снижению эластичности покрытий при растяжении на 23%, а для аналогичных полимерных композиций при тех же концентрациях нитевидных кристаллов BN наблюдается снижение эластичности покрытий при растяжении на 43%.

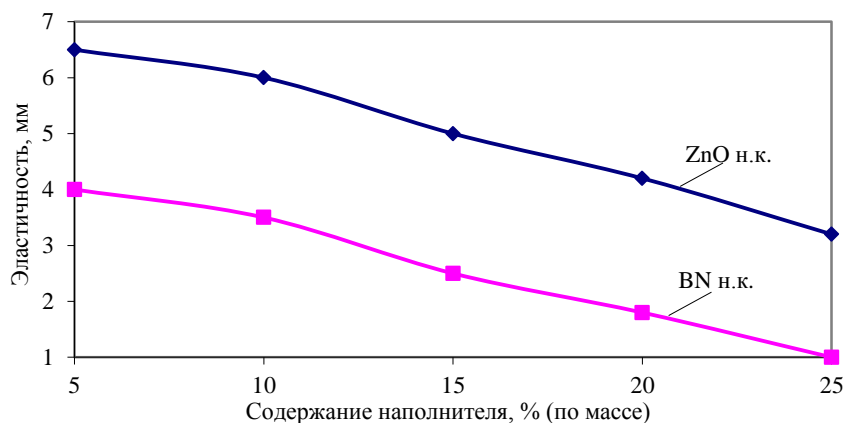


Рис. 2. Влияние формы и содержания армирующего наполнителя на эластичность покрытий при растяжении (по Эриксену)

Исследовано влияние толщины покрытий, содержащих армирующие наполнители ZnO н.к. и BN н.к., на их эластичность при растяжении. Результаты приведены для композиций, содержащих армирующие наполнители в количестве 10% (по массе). Видно, что с увеличением толщины покрытий их эластичность при растяжении монотонно снижается (рис. 3).

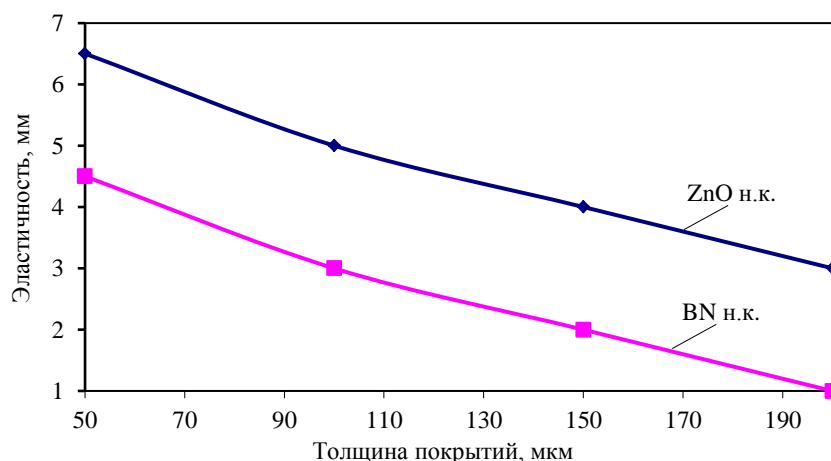


Рис. 3. Влияние толщины дисперсно-армированных покрытий на их эластичность при растяжении при содержании армирующего наполнителя 10% (по массе)

На рис. 4 приведены результаты определения водопоглощения покрытий на основе наполненных эпоксидно-полиамидных полимерных систем. Видно, что введение

в эпоксидно-полиамидную матрицу армирующего наполнителя влияет на водостойкость исследуемых покрытий, которую можно охарактеризовать водопоглощением через 30 сут выдержки в дистиллированной воде. Зависимость водопоглощения покрытий от концентрации введенного армирующего наполнителя – нелинейная. Присутствие армирующего наполнителя в эпоксидно-полиамидном пленкообразующем до 10% (по массе) способствует снижению водопоглощения. Увеличение содержания армирующего наполнителя в полимерной матрице до 25% (по массе) приводит к незначительному повышению водопоглощения покрытий, однако абсолютные значения водопоглощения исследуемых покрытий, содержащих наполнитель, существенно ниже, чем значения водопоглощения лаковой эпоксидно-полиамидной композиции. На основании полученных результатов можно предположить, что армирующие наполнители (ZnO н.к. и BN н.к.) способствуют структурообразованию и более плотной упаковке сегментов макромолекул, снижая пористость покрытий и уменьшая их водопоглощение.

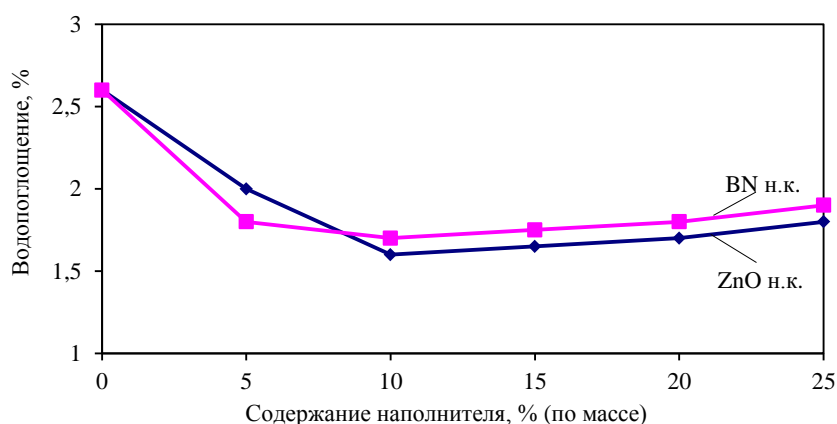


Рис. 4. Влияние формы и содержания армирующего наполнителя на водопоглощение покрытий после 30 сут испытаний в дистиллированной воде

На рис. 5 представлены результаты, полученные при определении эрозионной стойкости покрытий, на основе эпоксидно-полиамидного пленкообразующего, содержащего армирующие наполнители (ZnO н.к. и BN н.к.) в количестве от 5 до 25% (по массе). Видно, что на устойчивость покрытий к эрозии существенное влияние оказывает как форма частиц наполнителя, так и его концентрация в полимерной матрице.

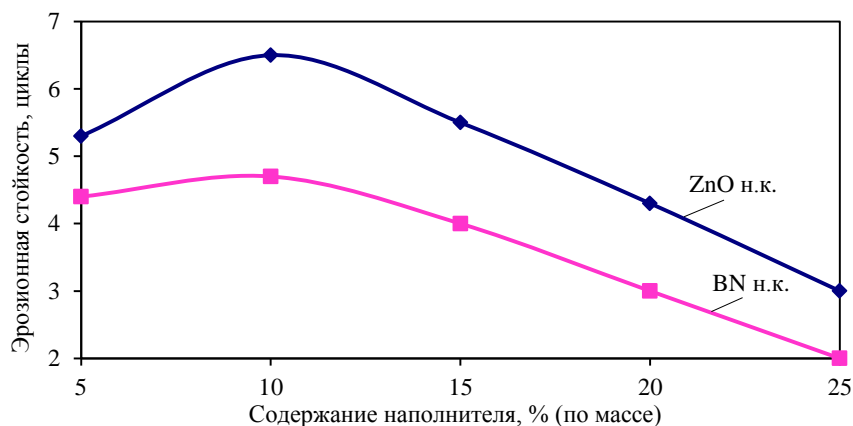


Рис. 5. Влияние формы и содержания армирующего наполнителя на эрозионную стойкость

Обе кривые зависимости эрозионной стойкости от содержания армирующего наполнителя имеют ярко выраженный экстремальный характер при максимальном значении эрозионной стойкости при содержании армирующего наполнителя 10% (по массе). Следует отметить, что абсолютные значения эрозионной стойкости покрытий, содержащих армирующий наполнитель ZnO н.к., при одних и тех же концентрациях наполнителя выше, чем у аналогичных покрытий, содержащих в качестве армирующего наполнителя BN н.к. При оптимальном содержании наполнителей (ZnO н.к. и BN н.к.) в эпоксидно-полиамидной полимерной матрице эрозионная стойкость покрытий, содержащих армирующий наполнитель ZnO н.к., представляющий собой четкие пространственные тетраэдры из четырех одиночных кристаллов, выходящих из единого центра, на 26% выше, чем у аналогичных покрытий, содержащих в качестве армирующего наполнителя нитевидные кристаллы BN н.к., имеющие игольчатую структуру. Таким образом, можно сделать предположение, что пространственная структура армирующего наполнителя оказывает влияние на процессы структурообразования в растворах полимеров и является важным фактором, определяющим усиливающее действие наполнителей в полимерах. Это очень важно в тех случаях, когда содержание наполнителя в полимерной системе относительно невелико [20]. Покрытия на основе эпоксидно-полиамидных композиций, наполненных нитевидными кристаллами ZnO, обладают более высокой эластичностью при растяжении и более высокой эрозионной стойкостью, чем аналогичные покрытия, наполненные нитевидными кристаллами BN, при одном и том же содержании наполнителя.

### Заключения

В данной работе исследовано влияние, которое оказывают пространственная структура (форма) армирующего наполнителя и его содержание в эпоксидно-полиамидной полимерной матрице на адгезию, физико-механические свойства, водопоглощение и эрозионную стойкость.

На основании полученных результатов исследований можно заключить, что пространственная структура армирующего наполнителя и его содержание в полимерном пленкообразующем влияют на адгезию покрытия к углепластику и алюминиевому сплаву 1163, водопоглощение, эластичность при растяжении, а также эрозионную стойкость покрытий.

Показано, что увеличение концентрации армирующего наполнителя ZnO н.к. в пределах от 5 до 20% (по массе) не приводит к существенному снижению адгезии к углепластику и сплаву 1163 как в исходном состоянии, так и после 7 сут увлажнения. Для композиций, содержащих в качестве армирующего наполнителя BN н.к. в количестве от 5% (по массе) и более, его увеличение приводит к снижению адгезии покрытия к защищаемой поверхности.

Существенное влияние пространственная структура армирующего наполнителя оказывает на эластичность покрытий при растяжении, полученных с применением армирующих наполнителей ZnO н.к. и BN н.к. Показано, что покрытия, содержащие в качестве армирующего наполнителя нитевидные кристаллы ZnO, представляющие собой пространственную макроструктуру осей тетраэдра, обладают более высокой эластичностью, чем аналогичные покрытия, которые содержат в качестве армирующего наполнителя нитевидные кристаллы BN.

Исследовано влияние армирующего наполнителя на водопоглощение эпоксидно-полиамидных композиций. Показано, что присутствие армирующего наполнителя в эпоксидно-полиамидном пленкообразующем до 10% (по массе) способствует снижению водопоглощения покрытий. На основании полученных результатов можно предположить, что

армирующие наполнители (ZnO н.к. и BN н.к.) способствуют структурообразованию и более плотной упаковке сегментов макромолекул, снижая пористость покрытий и уменьшая их водопоглощение.

Исследовано влияние пространственной структуры армирующего наполнителя и его содержания в эпоксидно-полиамидной полимерной матрице на эрозионную стойкость покрытий, полученных на основе наполненных композиций. Показано, что на устойчивость покрытий к эрозии существенное влияние оказывает как форма частиц наполнителя, так и его концентрация в полимерной матрице. На основании проведенных исследований установлено оптимальное содержание армирующего наполнителя в эпоксидно-полиамидном пленкообразующем. Показано, что покрытия, содержащие в своем составе нитевидные кристаллы ZnO, представляющие собой четкие пространственные тетраэдры из четырех одиночных кристаллов, выходящих из единого центра, обладают также более высокой устойчивостью к эрозии по сравнению с аналогичными покрытиями, содержащими нитевидные кристаллы BN, имеющие игольчатую структуру.

Таким образом, можно сделать предположение, что пространственная структура армирующего наполнителя оказывает влияние на процессы структурообразования полимеров и является важным фактором, определяющим усиливающее действие наполнителей в полимерах. Пространственная макроструктура нитевидных кристаллов ZnO, возможно, способствует образованию менее жесткой структуры наполненной эпоксидно-полиамидной полимерной композиции за счет перераспределения локальных микронапряжений, возникающих при формировании лакокрасочного покрытия на защищаемой поверхности.

Определено оптимальное содержание армирующего наполнителя в эпоксидно-полиамидной полимерной матрице, обеспечивающее наиболее высокий уровень адгезии, физико-механических свойств, эрозионной стойкости и водопоглощения.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП «ВИАМ» Г.Г. Шаповалову, А.А. Силаевой, Н.А. Коврижкиной за помощь в проведении экспериментальных работ, а также обсуждении результатов и объективную критику при написании данной статьи.

### Библиографический список

1. Каблов Е.Н. *Авиационное материаловедение: итоги и перспективы* // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
2. Железняк В.Г. *Современные лакокрасочные материалы для применения в изделиях авиационной техники* // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №5 (77). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.10.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
3. *История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди* / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
4. Каблов Е.Н. *Ключевая проблема – материалы* // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
5. 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.
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. Семенова Л.В., Нефедов Н.И., Белова М.В., Лаптев А.Б. *Системы лакокрасочных покрытий для вертолетной техники* // Авиационные материалы и технологии. 2017. №4. С. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.

8. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тезисы докладов XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
9. 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.
10. 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.
11. Филичкина В.Н. Современное состояние и тенденции развития производства и потребления эпоксидных смол // Химическая промышленность за рубежом.. М.: НИИТЭХИМ, 1988. Вып. 8. С. 18.
12. Мошинский Л.Я. Эпоксидные смолы и отвердители (структура, свойства, химия и топология отверждения). Тель-Авив: Аркадия пресс Ltd, 1995. 370 с.
13. 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.
14. Носков А.М., Новиков Н.И. Отверждение глицидиловых эфиров аминами в присутствии гидроксильных групп // Журнал прикладной химии. 2008. Т. 81. №12. С. 2733–2737.
15. Зиновьев В.Е. К вопросу связи адгезии и качества поверхностного слоя субстрата клеевого соединения // Вестник РГУПС. 2010. №4. С. 5–9.
16. Пестов А.В., Пузырев И.С., Мехаев А.В., Горбунова Т.И., Салоутин В.И., Смирнов С.В., Вичужанин Д.И., Матафонов П.П. Модифицирование адгезивных материалов на основе эпоксидных олигомеров фторсодержащими органическими соединениями // Журнал прикладной химии. 2014. Т. 87. №4. С. 482.
17. Липатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. М.: Химия, 1977. 603 с.
18. Липатов Ю.С., Сергеева Л.М. Адсорбция полимеров. Киев: Наукова думка, 1972. 196 с.
19. Фабуляк Ф.Г. Молекулярная подвижность в поверхностных слоях. Киев: Наукова думка, 1983. 144 с.
20. Липатов Ю.С. Межфазные явления в полимерах. Киев: Наукова думка, 1980. 260 с.
21. Семенович Г.М., Липатов Ю.С. Структура и свойства граничных слоев полимеров // Физико-химия многокомпонентных полимерных систем. Киев: Наукова думка, 1986. Т. 1. С. 186–221.
22. Шишелова Т.И., Степанова Н.Е., Плынская Д.А., Беляева М.А. Нитевидные кристаллы // Успехи современного естествознания. 2009. №8. С. 12–13.
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. Кузнецова В.А., Кузнецов Г.В., Шаповалов Г.Г. Исследование влияния молекулярной массы эпоксидной смолы на адгезионные, физико-механические свойства и эрозионную стойкость // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №8. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-8-8.
25. Яковлев А.Д., Яковлев С.А. Лакокрасочные покрытия функционального назначения. СПб.: Химиздат, 2016. 272 с.
26. Кузнецова В.А., Кондрашов Э.К., Владимирский В.Н. Прогнозирование эрозионной стойкости лакокрасочных покрытий с учетом динамических параметров // Авиационные материалы и технологии. 2003. №2. С. 50–53.
27. Кузнецова В.А., Кондрашов Э.К., Семенова Л.В., Кузнецов Г.В. О влиянии формы частиц оксида цинка на эксплуатационные свойства полимерных покрытий // Материаловедение. 2012. №12. С. 12–14.
28. Кузнецова В.А., Кондрашов Э.К., Владимирский В.Н., Кузнецов Г.В. Дисперсно-армированные эрозионностойкие покрытия // Авиационные материалы и технологии. 2003. Вып.: Лакокрасочные материалы и покрытия. С. 53–56.
29. Кузнецова В.А., Деев И.С., Кузнецов Г.В., Кондрашов Э.К. Влияние наполнителя на усталостную прочность и микроструктуру свободных полимерных пленок покрытий при циклическом растяжении // Заводская лаборатория. 2015. Т. 80. №5. С. 35–39.