

УДК 667.648.17

В.А. Кузнецова<sup>1</sup>, В.В. Емельянов<sup>1</sup>, С.А. Марченко<sup>1</sup>, А.А. Силаева<sup>1</sup>**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ  
ДЛЯ ЗАДЕЛКИ ДЕФЕКТОВ ЛИТЬЯ И ВЫРАВНИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ  
НА ДЕТАЛЯХ И ИЗДЕЛИЯХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-67-75

*Рассмотрены наиболее функциональные шпатлевочные системы на основе эпоксидной полимерной системы, наполненной сферическим алюминиевым порошком. Проведены исследования влияния содержания металлического наполнителя в полученных композициях и его удельной поверхности на прочностные характеристики – прочность и относительное удлинение при разрыве. Определено влияние удельной поверхности наполнителя и режима отверждения композиции на физико-механические свойства шпатлевочного слоя, его твердость, а также стойкость с минеральному маслу ЛЗ-МГ-2.*

**Ключевые слова:** металлополимерные композиции, шпатлевочные материалы, эпоксидные смолы, сферический алюминиевый порошок.

V.A. Kuznetsova<sup>1</sup>, V.V. Emelyanov<sup>1</sup>, S.A. Marchenko<sup>1</sup>, A.A. Silaeva<sup>1</sup>**APPLICATION OF METALPOLYMERIC COMPOSITIONS  
FOR SEAL OF CASTING DEFECTS AND SURFACE ALIGNMENT  
ON DETAILS AND PRODUCTS OF AVIATION ENGINEERING**

In this work the most functional filling systems on the basis of the epoxy polymeric system filled with spherical aluminum powder are considered. Researches of influence of the maintenance of metal filler in the received compositions and its specific surface on strength characteristics – breaking strength and relative lengthening are carried. It has defined, also influence of specific surface of filler and mode of curing of composition on physicomechanical properties of filling layer, its hardness, and also resistance to mineral oil LZ-MG-2.

**Keywords:** metalpolymeric compositions, filling materials, epoxies, spherical aluminum powder.

<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**

Развитие высокоскоростной авиации предъявляет новые требования к качеству внешних поверхностей самолетов. Такие неизбежные элементы поверхности, как регламентированные зазоры определенной величины между торцами обшивок и панелей, нахлесточные соединения обшивок внешней поверхности изделия, выходящие на теоретический контур изделия, значительно ухудшают аэродинамические характеристики летательного аппарата [1–5].

При отливке деталей из алюминиевых сплавов типа АЛ5, АЛ9, ВАЛ5 и др. наряду с допустимыми дефектами литья встречаются отдельные поры и раковины глубиной 1–3 мм, которые по условиям работы деталей недопустимы, поскольку приводят к снижению сопротивления усталости металла и способствуют развитию коррозии [5–7].

Для выравнивания внешней поверхности летательных аппаратов (щелей, зазоров, ступенек), а также неровностей в местах крепежных соединений широко

применяются шпатлевочные материалы. Как правило, такие материалы являются высоконаполненными системами, на основе полимерных пленкообразующих веществ.

Шпатлевочные материалы, которые могут быть использованы для выравнивания внешней поверхности, а также заполнения дефектов литья, должны соответствовать следующим основным требованиям:

- легко наноситься на поверхность, заполняя углубления за минимальное количество технологических операций;

- обеспечивать надежное заполнение зазоров между деталями при минимальной усадке при отверждении;

- обеспечивать аэродинамические и декоративные свойства поверхности;

- хорошо обрабатываться технологическим инструментом;

- обладать высокой адгезией к металлу; устойчивостью к вибрации и перепадам температур от  $-60$  до  $+135^{\circ}\text{C}$ , а также механической прочностью и эластичностью.

Следует отметить, что физико-механические свойства шпатлевочных материалов зависят как от химической природы полимерного пленкообразующего, так и от химической природы и структуры наполнителей.

В качестве полимерного пленкообразующего для создания шпатлевочных материалов могут использоваться низкомолекулярные диановые олигомеры или эпокси-кремнийорганические сополимеры, так как они не содержат летучих компонентов – в частности, растворителей, обуславливающих увеличение пористости и усадки при отверждении [8, 9].

Содержание наполнителей в шпатлевочных материалах колеблется в пределах от 1:3 до 1:5 и более. Такое высокое содержание наполнителей придает шпатлевочным материалам необходимые технологические свойства [10]. В качестве наполнителей при разработке шпатлевочных материалов чаще всего используют тальк, микротальк, оксиды различных металлов, а также слюду. Однако шпатлевочные материалы, содержащие вышеуказанные наполнители, обладают низкими механической прочностью и виброустойчивостью [8, 11].

Наиболее перспективным направлением при разработке шпатлевочных материалов является создание металлополимерных композиций, в которых в качестве наполнителя используется металлический сферический порошок. Металлополимерные композиции, выполняющие роль шпатлевочных материалов, могут быть использованы как для устранения дефектов литья (заделки пор и раковин) на деталях корпусов из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, так и для выравнивания внешней поверхности летательного аппарата с целью обеспечения заданных аэродинамических характеристик [12].

Помимо природы наполнителя его содержание в композиции и удельная поверхность могут значительным образом повлиять на важнейшие характеристики шпатлевочного материала, а именно – на прочность, эластичность, адгезию к подложкам и т. д. [10, 13–15].

Данная работа посвящена исследованию свойств металлополимерных композиций, используемых в качестве шпатлевочных материалов, и влияния характеристик наполнителя на эксплуатационные свойства таких композиций для выравнивания поверхности и заделки дефектов литья.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия», комплексная научная проблема 17.7. «Лакокрасочные материалы и покрытия на полимерной основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [16].

### Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны металлополимерные композиции на основе эпоксидных олигомеров с молекулярной массой от 360 до 470. Исследовали полимерные системы с разным содержанием алюминиевого порошка и различной удельной поверхностью ( $S_{уд}$ ): 1550–1740 и 4870–5300  $см^2/г$ . Алюминиевый порошок вводили в количестве 150, 200, 250 и 300% (по массе) в пересчете на полимерное пленкообразующее.

На основе вышеуказанных металлополимерных композиций получены свободные пленки для изучения их прочностных ( $\sigma_p$ ) и деформационных ( $\epsilon_p$ ) характеристик в исходном состоянии и после термического старения при температуре 135°C. Механические свойства свободных пленок определяли на разрывной машине в соответствии с ГОСТ 18299–72 при скорости нагружения образца 5 мм/мин. Исследовано влияние продолжительности отверждения металлополимерных композиций на их твердость.

Исследованы адгезия к алюминиевому сплаву Д16-АТ Ан.Окс.нхр и физико-механические свойства в исходном состоянии и после искусственного старения по циклу ЛИ-14 при температурах  $-60 \div +100^\circ C$  в течение 10 циклов согласно ММ1.595-15-133–2002. Метод испытаний лакокрасочных покрытий заключается в циклическом воздействии на испытываемый материал попеременно высокой влажности, а также отрицательных и повышенных температур. Один цикл испытаний соответствует воздействию: камеры влажности при  $\phi=98 \pm 2\%$  и температуре  $23 \pm 2^\circ C$  в течение 16–16,5 ч; охлаждению при температуре  $-60^\circ C$  в течение 1 ч; нагреву при температуре 135°C (или 80°C) в течение 2,5 ч; охлаждению при температуре  $-60^\circ C$  в течение 1 ч, затем нагреву при температуре 135°C в течение 2,5 ч, охлаждению образцов в течение 15 мин. Твердость металлополимерной композиции определяли в соответствии с ГОСТ 5233–89, прочность при ударе – по ГОСТ 4765–73. Адгезию покрытия на основе металлополимерной композиции определяли в соответствии с ГОСТ 15140–78 методом параллельных надрезов в исходном состоянии и после увлажнения в течение 10 сут. Адгезионную прочность при нормальном отрыве ( $\sigma_{адг}$ ) определяли по ГОСТ 27890–88, адгезионную прочность при сдвиге ( $\tau_{сдв}$ ) – по ГОСТ 14759–69. Стойкость отвержденных металлополимерных композиций к действию синтетического масла ЛЗ-МГ-2 определяли при температурах 20 и 120°C по ГОСТ 9.403–80.

### Результаты и обсуждение

Исследовано влияние удельной поверхности алюминиевого порошка и его содержания в полимерной матрице на механические свойства свободных пленок ( $\sigma_p$  и  $\epsilon_p$ ) в исходном состоянии и после термостарения при температуре 135°C в течение 300 ч. Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 1–3.

Таблица 1

**Свойства свободных пленок металлополимерных композиций  
в исходном состоянии и после термостарения**

Алюминиевый порошок		Прочность при разрыве ( $\sigma_p$ ), МПа			Удлинение при разрыве ( $\epsilon_p$ ), %			Толщина пленки, мкм
удельная поверхность $S_{уд}$ , $см^2/г$	содержание, % (по массе)	в исходном состоянии	после термостарения	снижение прочности, %	в исходном состоянии	после термостарения	снижение удлинения при разрыве, %	
1550–1740	150	6,9	6,0	13,0	4,3	3,1	28	560–610
	200	7,5	6,7	10,7	4,0	2,7	32,5	460–510
	250	8,1	7,3	9,9	3,5	2,2	37	428–458
	300	8,4	7,6	9,5	3,0	1,6	46	410–440
4870–5300	150	7,3	6,6	9,6	3,9	2,7	30	570–620
	200	8,0	7,3	8,7	3,7	2,4	35	600–680
	250	8,4	7,7	8,3	3,3	1,7	48,5	435–445
	300	8,7	8,0	8,0	2,8	1,3	53,5	428–445

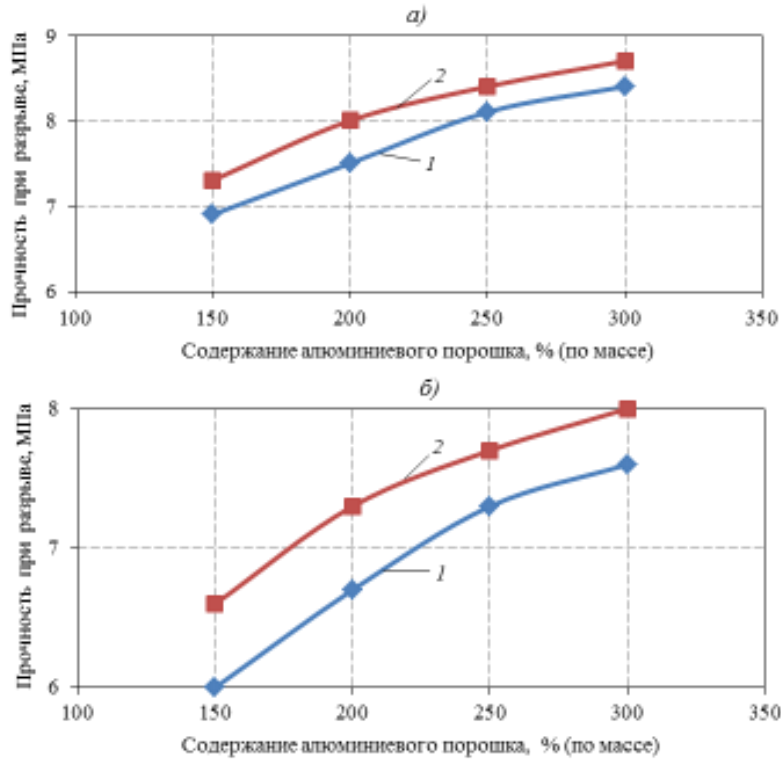


Рис. 1. Прочность при разрыве свободных пленок металлополимерных композиций из алюминиевого порошка с удельной поверхностью 1550–1740 (1) и 4870–5300 см<sup>2</sup>/г (2) в исходном состоянии (а) и после термостарения при температуре 135°С в течение 300 ч (б)

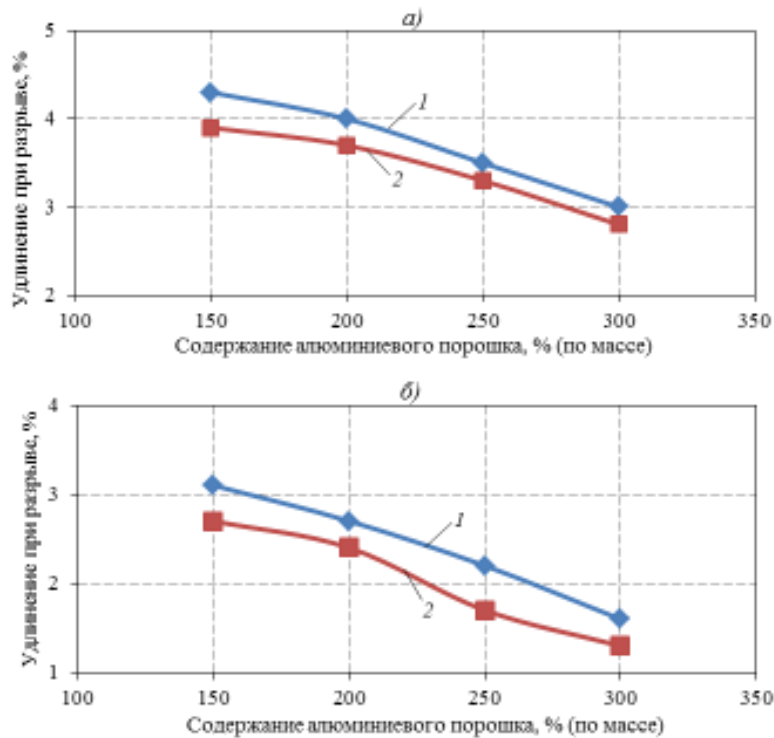


Рис. 2. Удлинение при разрыве свободных пленок металлополимерных композиций из алюминиевого порошка с удельной поверхностью 1550–1740 (1) и 4870–5300 см<sup>2</sup>/г (2) в исходном состоянии (а) и после термостарения при температуре 135°С в течение 300 ч (б)

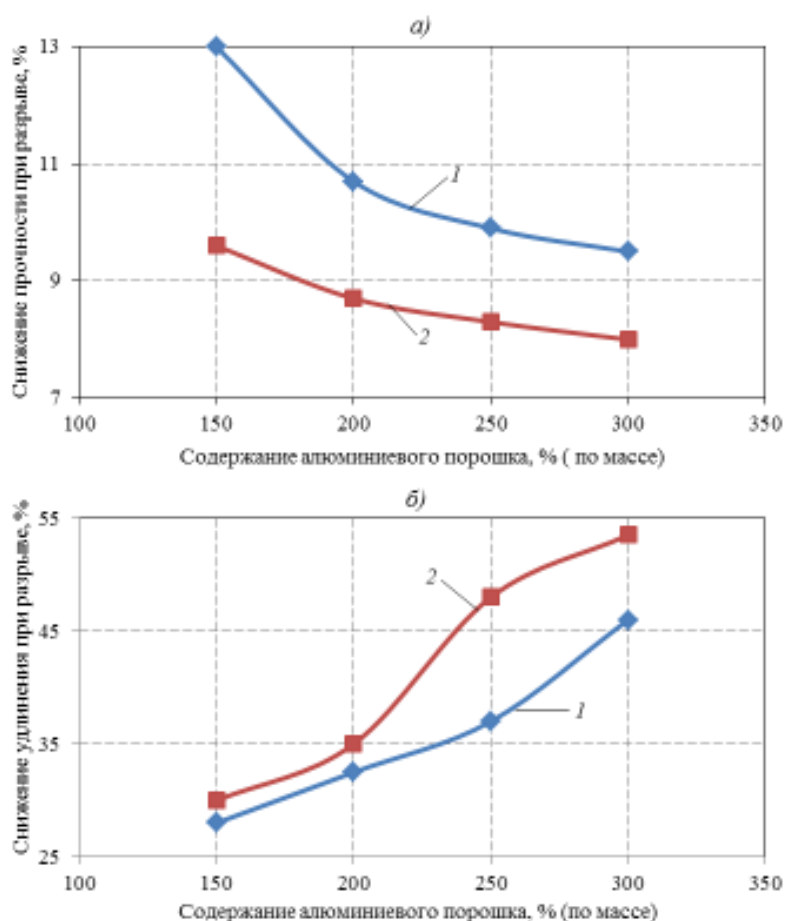


Рис. 3. Снижение прочности (а) и удлинения (б) при разрыве после термостарения при температуре 135°C в течение 300 ч пленок металлополимерных композиций из алюминиевого порошка с удельной поверхностью 1550–1740 (1) и 4870–5300 см<sup>2</sup>/г (2)

Из полученных результатов следует, что удельная поверхность алюминиевого порошка мало влияет на прочностные и деформационные характеристики свободных пленок металлополимерных композиций. С увеличением содержания алюминиевого порошка в полимерной матрице со 150 до 300% (по массе), независимо от его удельной поверхности, прочность при разрыве ( $\sigma_p$ ) монотонно возрастает, при этом удлинение при разрыве ( $\epsilon_p$ ) монотонно снижается.

Старение свободных пленок металлополимерных композиций при температуре 135°C в течение 300 ч приводит к незначительному снижению прочности при разрыве, при этом следует отметить, что с увеличением содержания алюминиевого порошка в полимерной композиции процент снижения прочности при разрыве ( $\sigma_p$ ) монотонно снижается (рис. 3). Причем наиболее интенсивно происходит уменьшение процента снижения прочности при разрыве для композиций, содержащих алюминиевый порошок с  $S_{уд}=1550-1740$  см<sup>2</sup>/г. При содержании алюминиевого порошка от 150 до 200% (по массе) снижение прочности составляет 2,3%, затем наблюдается снижение интенсивности изменения процента уменьшения прочности при разрыве. Аналогичные тенденции снижения прочности при разрыве наблюдаются для металлополимерных композиций, содержащих алюминиевый порошок с  $S_{уд}=4870-5300$  см<sup>2</sup>/г.

Старение свободных пленок металлополимерных композиций при температуре 135°C также влияет и на удлинение при разрыве, которое характеризует эластичность

металлополимерных композиций. Увеличение содержания алюминиевого порошка в полимерной матрице приводит к монотонному снижению эластичности (удлинению при разрыве), при этом следует отметить, что наиболее интенсивно уменьшение удлинения при разрыве наблюдается при содержании алюминиевого порошка >200% (по массе).

Из полученных результатов следует, что увеличение содержания алюминиевого порошка в полимерной матрице приводит к увеличению прочности при разрыве ( $\sigma_p$ ) и снижению удлинения при разрыве ( $\epsilon_p$ ), наиболее интенсивное снижение которого происходит при содержании алюминиевого порошка в полимерной матрице >200% (по массе), независимо от удельной поверхности вводимого в полимер алюминиевого порошка.

Адгезионные и физико-механические свойства металлополимерных композиций на основе эпоксидных олигомеров в значительной степени зависят от режима их отверждения. Режимы отверждения и физико-механические свойства металлополимерных композиций с содержанием порошка 200% (по массе), но с различной удельной поверхностью наполнителя приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Зависимость адгезионных и физико-механических свойств металлополимерных композиций от режима отверждения**

Удельная поверхность $S_{уд}$ , см <sup>2</sup> /г	Режим отверждения		Адгезия, балл, по ГОСТ 15140–78*		Твердость, отн. ед.	Прочность при сдвиге, МПа
	температура, °С	продолжительность, ч	в сухом состоянии	после 10 сут увлажнения		
1550–1740	20±2	24	1 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	0,23	8,2
	20±2	48	1 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	0,43	10,3
	120	3	1 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	0,57	11,5
4870–5300	20±2	24	2 <sub>1</sub>	3 <sub>1</sub>	0,2	7,7
	20±2	48	2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	0,4	7,9
	120	3	1 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>	0,53	10,2

\* При определении адгезии покрытия на основе металлополимерной композиции методом параллельных надрезов металлополимерные композиции наносили на образцы сплава Д16-АТ Ан.Окс.нхр, окрашенные грунтовкой ВГ-28.

Анализ полученных результатов показал, что на адгезионные и механические свойства, а также твердость металлополимерных композиций существенное влияние оказывают режимы их отверждения. Наиболее высокими адгезионными и механическими свойствами, а также твердостью обладают металлополимерные композиции, отвержденные при температуре 120°С в течение 3 ч. Следует отметить, что металлополимерные композиции, содержащие алюминиевый порошок с удельной поверхностью 1550–1740 см<sup>2</sup>/г, при одинаковых режимах отверждения обладают более высокой твердостью, прочностью при сдвиге, а также адгезией.

Исследовано влияние удельной поверхности алюминиевого порошка и температуры отверждения металлополимерных композиций с содержанием металлического порошка 200% (по массе) на стойкость к действию синтетического масла ЛЗ-МГ-2. На рис. 4 приведены кинетические кривые изменения массы (набухания) металлополимерных композиций при испытании в синтетическом масле ЛЗ-МГ-2 при температурах 20 и 120°С. Из полученных результатов следует, что процесс набухания металлополимерных композиций в синтетическом масле существенно зависит от режимов отверждения композиций. При температуре испытания 20°С набухание металлополимерных композиций практически не зависит от удельной поверхности алюминиевого порошка (кривые практически совпадают). Через 30 сут испытаний наступает равновесное состояние, для композиции с удельной поверхностью 1550–1740 см<sup>2</sup>/г набухание составило 0,1%, для композиции с удельной поверхностью 4870–5300 см<sup>2</sup>/г набухание

составило 0,12%. При температуре 120°C набухание металлополимерной композиции возрастает и существенно зависит от удельной поверхности алюминиевого порошка. Для композиции, содержащей алюминиевый порошок с  $S_{уд}=1550-1740 \text{ см}^2/\text{г}$ , максимальное значение набухания в масле ЛЗ-МГ-2 составляет 0,78%, равновесное состояние достигается через 30 сут. Для композиции, содержащей алюминиевый порошок с  $S_{уд}=4870-5300 \text{ см}^2/\text{г}$ , набухание в масле ЛЗ-МГ-2 протекает более интенсивно, максимальное значение набухания составляет 1,5%, равновесное состояние достигается через 40 сут. Можно предположить, что алюминиевый сферический порошок с  $S_{уд}=1550-1740 \text{ см}^2/\text{г}$  способствует образованию более плотной структуры.

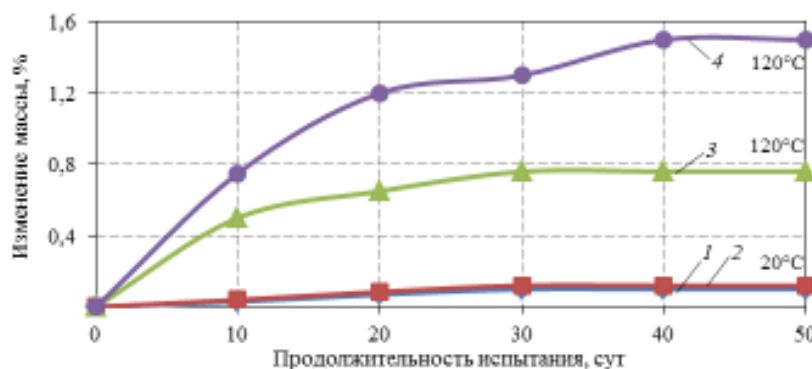


Рис. 4. Кинетика изменения массы металлополимерных композиций с содержанием 200% (по массе) алюминиевого порошка с удельной поверхностью 1550–1740 (1, 3) и 4870–5300  $\text{см}^2/\text{г}$  (2, 4) при испытании в масле ЛЗ-МГ-2 при температурах 20 и 120°C

В табл. 3 приведены результаты исследований адгезионных и физико-механических свойств металлополимерной композиции (на основе дианового эпоксидного олигомера), содержащей алюминиевый порошок с удельной поверхностью 1550–1740  $\text{см}^2/\text{г}$ , в исходном состоянии и после искусственного старения по циклу ЛИ-14 при температурах  $-60\div+100^\circ\text{C}$  в течение 10 циклов.

Таблица 3

**Адгезионные и физико-механические свойства покрытий  
на основе металлополимерной композиции**

Режимы отверждения		Адгезионная прочность $\sigma_{адг}$ , МПа	Прочность при сдвиге $\tau_{сдв}$ , МПа	Физико-механические свойства	
температура, °C	продолжительность, ч			прочность при ударе, Дж	прочность при растяжении, мм
В исходном состоянии					
20±2	24	4,12	9,2	5,0	2,2
20±2	48	4,6	10,3	5,0	2,4
120	3	5,8	11,5	5,0	2,5
После цикла ЛИ-14 при старении при температурах $-60\div+100^\circ\text{C}$					
20±2	24	5,1	11,0	5,0	2,0
20±2	48	5,2	10,9	5,0	2,1
120	3	5,0	10,8	5,0	2,1

Из полученных результатов следует, что металлополимерная композиция обладает достаточно высокими физико-механическими свойствами, адгезионной прочностью при нормальном отрыве ( $\sigma_{адг}$ ), а также при сдвиге ( $\tau_{сдв}$ ) как в исходном состоянии, так и после искусственного старения по циклу ЛИ-14 при температурах  $-60\div+100^\circ\text{C}$  в течение 10 циклов. Искусственное старение не приводит к существенному снижению

прочностных характеристик металлополимерных композиций. Применение искусственной сушки при отверждении металлополимерной композиций при температуре 120°C в течение 2 ч способствует повышению адгезионной прочности при нормальном отрыве на 40%, а при сдвиге – на 25%.

Следует отметить, что разработанные металлополимерные композиции, содержащие оптимальное количество (200% (по массе)) сферического алюминиевого порошка, достаточно технологичны, легко наносятся шпателем, разравниваются и после сушки обрабатываются различными механическими инструментами, в частности фрезой.

### Заключения

Проведенные исследования показали, что металлополимерные композиции на основе диановых эпоксидных олигомеров, содержащие оптимальное количество сферического алюминиевого порошка с удельной поверхностью 1550–1740 см<sup>2</sup>/г, обладают высокими адгезионными, физико-механическими, а также технологическими свойствами и могут быть использованы в качестве шпатлевки для выравнивания поверхности и заделки дефектов литья.

Сопоставляя результаты, полученные при исследовании металлополимерных композиций, можно сделать следующие выводы:

– свойства металлополимерных композиций – прочность ( $\sigma_p$ ) и удлинение ( $\epsilon_p$ ) при разрыве – зависят от содержания алюминиевого порошка в композиции и не зависят от его удельной поверхности;

– адгезионные и физико-механические свойства, прочность при сдвиге, устойчивость к синтетическому маслу ЛЗ-МГ-2 металлополимерных композиций зависят от режима их отверждения и удельной поверхности алюминиевого порошка.

Металлополимерные композиции, выполняющие роль шпатлевочных материалов, могут быть использованы как для устранения дефектов литья (заделки пор и раковин) на деталях корпусов из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, так и для выравнивания внешней поверхности летательного аппарата в целях обеспечения заданных аэродинамических характеристик.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП «ВИАМ» Г.Г. Шаповалову, Н.Н. Иванниковой и Н.А. Коврижкиной за помощь в изготовлении металлополимерных композиций, а также за обсуждение результатов и объективную критику при написании данной статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
2. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Перспективные алюминиевые сплавы и технологии их соединения для изделий авиакосмической техники // Тез. докл. 2-й Междунар. конф. «Алюминий-21. Сварка и пайка». СПб., 2012. Ст. 8 (CD).
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
4. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
5. Шавнев А.А., Курбаткина Е.И., Косолапов Д.В. Методы соединения алюминиевых композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2017. №3 (48). С. 35–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-35-42.

6. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №4. С. 18–22.
7. 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.
8. 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.
9. Еськов А.А., Лебедева Т.А., Белова М.В. Лакокрасочные материалы с пониженным содержанием летучих веществ (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №6. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-8-8.
10. Герасимова Л.Г., Скороходова О.Н. Наполнители для лакокрасочной промышленности. М.: ЛКМ-пресс, 2010. 224 с.
11. 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: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №8. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения: 01.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-8-8.
12. 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.
13. Нарисава И. Прочность полимерных материалов. Пер. с японского. М.: Химия, 1987. 364 с.
14. 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.
15. Металлополимерная композиция: пат. 2618031С1 Рос. Федерация; заявл. 02.06.16; опубл. 02.05.17.
16. 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.