

Научная статья

УДК 621.792.053

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-54-63

СВОЙСТВА ТОКОПРОВОДЯЩЕГО КЛЕЯ С ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ОТВЕРЖДЕНИЯ

Н.Ф. Лукина¹, А.Ю. Исаев¹, О.А. Стародубцева¹, О.С. Балабанова¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрены свойства опытного токопроводящего клея с пониженной температурой отверждения. По своему назначению и физико-механическим характеристикам данный клей близок к токопроводящему клею марки ВКП-11. Преимуществом опытного клея является пониженная температура отверждения (60 °С вместо 120 °С для клея ВКП-11). Представлены также свойства опытного токопроводящего клея, содержащего в своем составе карбонильный никель в качестве токопроводящего наполнителя, в интервале температур от –60 до +120 °С в исходном состоянии и после воздействия искусственных факторов.

Ключевые слова: токопроводящий клей, клеевые соединения, электропроводность, прочность при сдвиге, режим отверждения, назначение клеевой композиции

Для цитирования: Лукина Н.Ф., Исаев А.Ю., Стародубцева О.А., Балабанова О.С. Свойства токопроводящего клея с пониженной температурой отверждения // Труды ВИАМ. 2023. № 5 (123). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-54-63.

Scientific article

APPROACHES TO CREATION OF CONDUCTING GLUE FROM THE LOWERED CURING TEMPERATURE

N.F. Lukina¹, A.Yu. Isaev¹, O.A. Starodubtseva¹, O.S. Balabanova¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Properties of pilot conducting glue with ponidenny temperature of curing are considered. According to the destination pilot glue is close to conducting glue of the VKP-11 brand of similar assignment. Advantage of pilot glue is the lowered temperature of curing (60 °C instead of 120 °C for VKP-11 glue). Properties of the pilot conducting glue containing in the structure carbonyl nickel as conducting filler, in the range of temperatures from –60 to +120 °C in initial condition and after influence of artificial external factors are investigated.

Keywords: conducting glue, glued joints, conductivity, durability at shift, curing mode, assignment of glue composition

For citation: Lukina N.F., Isaev A.Yu., Starodubtseva O.A., Balabanova O.S. Approaches to creation of conducting glue from the lowered curing temperature. *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-54-63.

Введение

В настоящее время в различных отраслях промышленности применяется ряд токопроводящих клеев российского и зарубежного производства, различающихся температурой отверждения, диапазоном рабочих температур и электропроводящими свойствами [1–9]. Эти клеи обеспечивают электрический контакт между соединяемыми

материалами в составе конструкций различного назначения – в полупроводниковых приборах, радиодеталях, микроплатах, конденсаторах и других узлах приборной техники [10–15]. Токопроводящие клеи различаются уровнем токопроводности, что в основном обеспечивается природой токопроводящего наполнителя, который содержится в их составе. Разработан широкий ассортимент токопроводящих клеев, в составе которых используются драгоценные металлы (серебро, золото, палладий), за счет чего достигается высокий уровень токопроводности (10^{-6} – 10^{-8} Ом·м) [16–19]. В то же время во многих случаях требуются соединения с более низким уровнем электропроводности. Для этого применяют клеи, в составе которых используют тонкодисперсные порошки никеля, меди или графита [20–29].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны токопроводящие клеи марок ВКП-6 и ВКП-6-1 с карбонильным никелем в качестве токопроводящего наполнителя, работоспособные при температурах до 120 °С. Однако в настоящее время такие клеи не выпускают из-за отсутствия сырья. Вместо данных клеев разработан токопроводящий клей марки ВКП-11, содержащий в качестве токопроводящего наполнителя карбонильный никель, который отверждается при температуре 120 °С и обладает прочностными и электропроводящими свойствами на уровне данных аналогов. Токопроводящий клей ВКП-11 предназначен для склеивания алюминиевых сплавов, коррозионностойкой стали, латуни и меди, а также для создания электрического контакта в конструкциях, работающих в интервале температур от –60 до +120 °С. Клеевые соединения, выполненные с его использованием, выдерживают воздействие повышенных температур (до 120 °С), в том числе воздействие данной температуры в течение 1000 ч. Клей ВКП-11 отвечает современным техническим требованиям, предъявляемым к токопроводящим клеям, и нашел широкое применение в авиационной и других отраслях промышленности.

Известны зарубежные клеи-аналоги, которые обладают стабильными электрическими свойствами в диапазоне рабочих температур, однако имеют высокую температуру отверждения. Так, клеи фирм Konnect Copper Corp. (США) и HERAEUS (Германия) отверждаются при температуре не менее 120 °С, клей Sk70N фирмы Namics Corporation (Япония) – при температуре не менее 150 °С, а клей DM 6030 НК фирмы Diemat (США) – при температуре не менее 175 °С. Однако высокие температуры отверждения электропроводящих клеев требуют использования в процессе склеивания специального оборудования, что практически сделать невозможно применительно к крупногабаритным конструкциям. Кроме того, в этом случае повышаются трудоемкость и энергоемкость процесса склеивания. Поэтому в настоящее время предъявляются требования к созданию энергосберегающих технологий склеивания, в том числе с использованием токопроводящих клеев, взамен технологий, предписывающих производить отверждение клеевых соединений при повышенных температурах.

В связи с этим актуальной является разработка токопроводящего клея с теплостойкостью 120 °С и пониженной температурой отверждения (не более 60 °С), обеспечивающего склеивание и создание электрического контакта между металлическими поверхностями.

Получен образец опытного токопроводящего клея, который содержит в качестве токопроводящего наполнителя карбонильный никель, а благодаря использованию в его составе системы отвердителей способен отверждаться при пониженной температуре 60 °С (вместо 120 °С для клея-аналога марки ВКП-11). Опытный токопроводящий клей обладает удовлетворительным уровнем адгезионных и токопроводящих свойств: прочность клеевых соединений при сдвиге при температуре испытания 20 °С

изменяется в интервале значений от 14,0 до 15,5 МПа, а при температуре 120 °С – в интервале от 4,5 до 4,7 МПа; удельное объемное сопротивление клея при 20 °С составляет $(4,5-4,9) \cdot 10^{-4}$ Ом·м, при 80 °С: $(0,5-0,8) \cdot 10^{-3}$ Ом·м, при 120 °С: $(0,9-1,2) \cdot 10^{-3}$ Ом·м. Клей работоспособен в диапазоне температур от –60 до +120 °С.

В результате проведенных исследований установлено, что опытный токопроводящий клей можно использовать в качестве полимерной основы при создании токопроводящего клея, предназначенного для электрического контакта между металлическими поверхностями взамен токопроводящего клея марки ВКП-11 с температурой отверждения 120 °С.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 15.1. «Многофункциональные клеящие системы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13–15].

Материалы и методы

В качестве объекта исследований использовали образец опытного токопроводящего клея, содержащего в своем составе карбонильный никель в качестве токопроводящего наполнителя.

Свойства клея определяли с использованием различных методов исследований:

- плотность отвержденного клея – по ГОСТ 15139–69;
- клеящие свойства при сдвиге – по ГОСТ 14759–91;
- удельное электрическое сопротивление – по ГОСТ 20214–74;
- влияние термического старения – по СТО 1-595-20-101–2016;
- влияние тепловлажностного старения – по ГОСТ 9.707–81;
- влияние воздействия изменения температуры среды (термоциклирование) – по ГОСТ 9.707–81;
- влияние условий камеры тропиков – по СТП 1-595-20-100–2002;
- влияние микологической среды – по ГОСТ 9.049–91;
- динамическую вязкость – с использованием реометра Physica (модель MCR 302) фирмы Anton Paar в соответствии с ISO 6721-10.

Результаты и обсуждение

Опытный токопроводящий клей в готовом для применения виде представляет собой однородную вязкую массу черного цвета. Плотность отвержденного клея составляет 2,65–2,70 г/см³, динамическая вязкость при температуре 20 °С варьируется от 205 до 245 Па·с, жизнеспособность при температуре 20 °С – не менее 1 ч. Отверждение клеевых соединений, выполненных с использованием данного клея, проводили при температуре 60 °С.

Исследованы механические свойства клеевых соединений, выполненных с использованием опытного токопроводящего клея в диапазоне температур от –60 до +120 °С, при склеивании алюминиевого сплава марки Д16-АТ Ан.Окс.хром и медного сплава марки М1 (травленного). Результаты испытаний, представленные в табл. 1, показывают, что данный клей обладает такими прочностными характеристиками при указанных температурах, которые находятся на уровне свойств токопроводящего клея ВКП-11 [1–5].

В табл. 2 представлены электрические свойства опытного токопроводящего клея в исходном состоянии. Видно, что данный клей сохраняет электропроводящие свойства при температурах до 120 °С.

Таблица 1

**Механические свойства клеевых соединений, выполненных
с использованием опытного токопроводящего клея**

Свойства	Склеиваемые материалы	Значения свойств* при температуре испытания, °С				
		–60	20	80	120	150
Прочность при сдвиге, МПа	Д16-АТ Ан.Окс.хром	<u>12,4–21,6</u> 15,9	<u>14,5–16,0</u> 15,0	<u>9,0–11,5</u> 10,0	<u>4,5–5,0</u> 4,7	<u>3,5–3,9</u> 3,7
	Медный сплав М1 (травленный)	<u>7,8–13,5</u> 10,2	<u>8,0–11,8</u> 9,6	–	<u>3,4–4,6</u> 3,9	–
Прочность при равномерном отрыве, МПа	Д16-АТ Ан.Окс.хром	–	<u>46,5–50,0</u> 48,0	<u>22,5–26,0</u> 25,0	<u>11,5–13,5</u> 12,5	–

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Таблица 2

Электрические свойства опытного токопроводящего клея в исходном состоянии

Склеиваемые материалы	Удельное электрическое сопротивление*, Ом·м, при температуре испытания, °С		
	20	80	120
Д16-АТ Ан.Окс.хром	<u>(0,2–3,4)·10^{–4}</u> 1,5·10 ^{–4}	<u>(0,2–1,0)·10^{–3}</u> 0,6·10 ^{–3}	<u>(1,0–1,3)·10^{–3}</u> 1,2·10 ^{–3}

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Клеевые соединения выдерживают длительное воздействие температуры 120 °С (табл. 3). После воздействия этой температуры в течение 500 и 1000 ч прочность клеевых соединений алюминиевого сплава Д16-АТ Ан.Окс.хром при температуре испытания 20 °С снижается незначительно – на 10–13 %, однако существенно повышается (на 70–80 %) при температуре испытания 120 °С. Клей также сохраняет уровень электропроводящих свойств после термического старения при температуре 120 °С в течение 500 и 1000 ч, что подтверждается данными, представленными в табл. 4.

Таблица 3

**Механические свойства клеевых соединений, выполненных с использованием
опытного токопроводящего клея, после выдержки при повышенных температурах**

Склеиваемые материалы	Условия выдержки		Прочность при сдвиге*, МПа, при температуре испытания, °С	
	температура, °С	продолжительность, ч	20	120
Д16-АТ Ан.Окс.хром	Контрольный показатель		<u>14,5–16,0</u> 15,0	<u>4,5–5,0</u> 4,7
	120	500	<u>12,0–14,0</u> 13,5	<u>7,0–9,5</u> 8,5
	120	1000	<u>12,0–14,5</u> 13,0	<u>6,5–9,5</u> 8,0

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Таблица 4

Электрические свойства опытного токопроводящего клея после теплового старения

Склеиваемые материалы	Условия выдержки при тепловом старении		Удельное электрическое сопротивление*, Ом·м, при температуре испытания 20 °С
	температура, °С	продолжительность, ч	
Д16-АТ Ан.Окс.хром	Контрольный показатель		<u>(0,2–3,4)·10^{–4}</u> 1,5·10 ^{–4}
	120	500	<u>(0,9–1,2)·10^{–3}</u> 1,1·10 ^{–3}
	120	1000	<u>(1,0–1,3)·10^{–3}</u> 1,2·10 ^{–3}

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

В табл. 5 приведены результаты испытаний клеевых соединений Д16-АТ Ан.Окс.хром, выполненных с использованием опытного токопроводящего клея, которые показывают его устойчивость при циклическом перепаде температур (термоциклирование по режиму: +100 °С в течение 4,5 ч; +20 °С в течение 18,5 ч; –60 °С в течение 1 ч; количество циклов: 10). Прочность клеевых соединений после воздействия этого фактора снижается незначительно: при температуре 20 °С – на 7 %, при температуре 120 °С – на 11 %.

Таблица 5

Влияние термоциклирования на прочность клеевых соединений, выполненных с использованием опытного токопроводящего клея

Склеиваемые материалы	Условия воздействия	Прочность при сдвиге*, МПа, при температуре испытания, °С	
		20	120
Д16-АТ Ан.Окс.хром	Контрольный показатель	<u>14,5–16,0</u> 15,0	<u>4,5–5,0</u> 4,7
	Термоциклирование (10 циклов)	<u>13,0–15,0</u> 14,0	<u>4,0–4,5</u> 4,2

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Исследовано влияние воды и повышенной влажности на свойства клеевых соединений, выполненных с использованием опытного токопроводящего клея. Установлено, что влагопоглощение пленки отвержденного токопроводящего клея составляет 4,4 %, а водопоглощение: 4 %.

Таблица 6

Водо- и влагостойкость клеевых соединений, выполненных с использованием опытного токопроводящего клея (продолжительность экспозиции: 30 сут)

Склеиваемые материалы	Условия воздействия	Прочность при сдвиге*, МПа, при температуре испытания, °С	
		20	120
Д16-АТ Ан.Окс.хром	Контрольный показатель	<u>14,5–16,0</u> 15,0	<u>4,5–5,0</u> 4,7
	Воздействие влажной атмосферы	<u>12,5–14,0</u> 13,0	<u>3,4–4,1</u> 3,7
	Воздействие воды	<u>12,0–14,0</u> 13,0	<u>3,8–4,5</u> 4,1

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Результаты испытаний, представленные в табл. 6, показывают, что опытный токопроводящий клей выдерживает воздействие данных факторов без существенного снижения своих прочностных свойств: после выдержки клеевых соединений во влажной атмосфере в течение 30 сут прочность при сдвиге при температуре испытания 20 °С снижается на 13 %, а при 120 °С – на 21 %; после выдержки в воде в течение 30 сут прочность при сдвиге при температурах испытания 20 и 120 °С уменьшается на 13 %.

Исследовано влияние условий камеры тропического климата (КТК) в течение 1 и 3 мес на прочность клеевых соединений Д16-АТ Ан.Окс.хром при сдвиге по следующим режимам (1 цикл испытаний: 1 сут):

- температура 50 °С и влажность 98 % в течение 8 ч;
- температура 20 °С и влажность 98 % в течение 12 ч;
- температура 20 °С и влажность 65 % в течение 4 ч.

Результаты испытаний, представленные в табл. 7, показывают характер изменения прочностных показателей после воздействия условий КТК: прочностные характеристики снижаются при температуре испытания 20 °С после 1 мес испытаний на 13 %, после 3 мес – на 17 %; при температуре испытания 120 °С – соответственно на 55 и 62 %, что указывает на необходимость дополнительной защиты клеевых соединений.

Таблица 7

**Тропическая стойкость клеевых соединений, выполненных
с использованием опытного токопроводящего клея**

Склеиваемые материалы	Условия воздействия	Прочность при сдвиге*, МПа, при температуре испытания, °С	
		20	120
Д16-АТ Ан.Окс.хром	Контрольный показатель	<u>14,5–16,0</u> 15,0	<u>4,5–5,0</u> 4,7
	Воздействие условий КТК в течение:		
	1 мес	<u>12,5–14,0</u> 13,0	<u>1,5–2,5</u> 2,1
	3 мес	<u>12,0–13,5</u> 12,5	<u>1,2–2,4</u> 1,8

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Исследован уровень устойчивости клеевых соединений, выполненных с использованием опытного токопроводящего клея, к воздействию агрессивных химических сред. Результаты испытаний представлены в табл. 8. Из приведенных данных видно, что клеевые соединения устойчивы к воздействию масла ИПМ-10, нефраса С2-80/120, топлива ТС-1 и ацетона: прочность клеевых соединений после воздействия данных химических сред в течение 5 сут при температуре испытания 20 °С не изменилась, а при температуре испытаний 120 °С снижается незначительно – на 6–15 %.

Таблица 8

**Стойкость клеевого соединения, выполненного
с использованием опытного токопроводящего клея,
к воздействию химических сред (продолжительность экспозиции: 5 сут)**

Склеиваемые материалы	Агрессивная среда	Прочность при сдвиге*, МПа, при температуре испытания, °С	
		20	120
Д16-АТ Ан.Окс.хром	Контрольный показатель	<u>14,5–16,0</u> 15,0	<u>4,5–5,0</u> 4,7
	Масло ИПМ-10	<u>13,5–16,5</u> 15,0	<u>3,9–4,7</u> 4,4
	Нефрас С2-80/120	<u>14,0–16,5</u> 15,0	<u>3,9–4,5</u> 4,3
	Топливо ТС-1	<u>14,4–14,9</u> 15,0	<u>3,7–4,4</u> 4,0
	Ацетон	<u>13,5–16,5</u> 15,0	<u>3,9–4,3</u> 4,1

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

С помощью испытаний установлен уровень устойчивости клеевых соединений, выполненных с использованием опытного токопроводящего клея, к воздействию микологической среды в сочетании с повышенной влажностью ($\phi = 98\%$) в течение 1 и

3 мес, а также к влиянию комплекса природных атмосферных условий умеренного климата с промышленной атмосферой (г. Москва) и умеренного теплого климата с приморской атмосферой (г. Геленджик) (срок экспозиции: 1 мес): прочность клеевых соединений после воздействия этих факторов осталась без изменений и находится на уровне контрольных показателей.

Исследована коррозионная агрессивность опытного токопроводящего клея в контакте с цветными и черными металлами. Установлено, что данный клей можно использовать для склеивания алюминиевых сплавов с анодно-оксидными покрытиями с медными сплавами и конструкционными сталями с защитными покрытиями, допускающими нагрев до температуры 120 °С в соответствии с требованиями отраслевой документации.

Заключения

В результате выполненных исследований установлена возможность получения опытного токопроводящего клея, наполненного карбонильным никелем, который способен отверждаться при температуре 60 °С и обладает физико-механическими характеристиками и электропроводящими свойствами на уровне аналога – токопроводящего клея марки ВКП-11 с температурой отверждения 120 °С.

Результаты исследований показали, что клеевые соединения, выполненные с использованием опытного токопроводящего клея, устойчивы к воздействию искусственных факторов, имитирующих эксплуатационные (термическое старение, термоциклирование, воздействие воды, влаги, микробиологической среды и агрессивных химических сред), и неустойчивы к влиянию условий камеры тропического климата, в связи с чем требуют дополнительной защиты.

В целом установлено, что опытный токопроводящий клей можно использовать в качестве полимерной основы при создании токопроводящего клея с пониженной температурой отверждения 60 °С, предназначенного для электрического контакта между металлическими поверхностями, взамен токопроводящего клея марки ВКП-11 с температурой отверждения 120 °С, что существенно снизит энергоемкость процесса склеивания.

Список источников

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
3. Каблов Е.Н. На перекрестке науки, образования и промышленности // *Эксперт*. 2015. № 15 (941). С. 49–53.
4. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития полимерных композиционных и функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 231–242.
5. *Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова*. 7-е изд., доп. и перераб. М.: ВИАМ, 2019. Т. 10: Клеи, герметики, резины, гидрожидкости. Ч. 1: Клеи, клеевые препреги. 276 с.
6. Петрова А.П., Донской А.А. Клеящие материалы. Герметики. СПб.: Профессионал, 2008. 589 с.
7. Аниховская Л.И., Батизат В.П., Петрова А.П. Клеи и их применение // *Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков*. М.: ВИАМ, 1994. С. 396–409.
8. Абдуллин М.И., Басыров А.А., Колтаев Н.В. и др. Токопроводящие полимерные композиции для 3D-печати // *Бюллетень науки и практики*. 2016. № 4. С. 44–50.

9. Аронович Д.А., Варламов В.П., Войтович В.А. и др. Склеивание в машиностроении: справочник в 2 т. / под общ. ред. Г.В. Малышевой. М.: Наука и Технологии, 2005. Т. 1. 544 с.
10. Ефимов В.А. Климатическая стойкость клеевых соединений // Клеи. Герметики. Технологии. 2009. № 6. С. 6–11.
11. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
12. Петрова А.П., Исаев А.Ю., Лукина Н.Ф., Павлюк Б.Ф. Влияние наполнителей на электропроводность клеев и свойства электропроводящих клеев. Обзор // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. № 8. С. 9–15.
13. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Павлюк Б.Ф., Исаев А.Ю., Беседнов К.Л. Наполнители для токопроводящих клеев // Новости материаловедения. Наука и техника. 2017. № 5–6 (28). Ст. 06. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 30.11.2022).
14. Быков П.М., Егоренкова С.В., Кузьминов А.А. Эксплуатационные материалы: учеб. пособие. Череповец: ЧГУ, 2013. 340 с.
15. Беседнов К.Л., Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Исаев А.Ю. Влияние состава и условий термообработки на проводящие свойства серебросодержащих токопроводящих клеевых композиций (обзор). Часть 1 // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-64-78.
16. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Куцевич К.Е., Нищев К.Н. Метод определения прочности сцепления серебряного покрытия с кремниевой подложкой с использованием клея // Труды ВИАМ. 2015. № 4. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-12-12.
17. Курилин С.Л. Электротехнические материалы и технологии электромонтажных работ: учеб.-метод. пособие в 3 ч. Гомель : БелГУТ, 2008. Ч. 1: Проводниковые и полупроводниковые материалы. 88 с.
18. Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю., Петрова А.П. Влияние наполнителей на свойства клеевых препрегов и ПКМ на их свойства // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-51-55.
19. Lewis A., Babiarz A. Conductive Adhesive Dispensing Process Considerations // Asymtek, Nordson Electronic Business Group. URL: <http://www.asymtek.com> (дата обращения: 19.01.2023).
20. Ранжин Ю.С., Калашников Ю.Н., Литвиненко Н.П. Электропроводящие клеи для автоматической сборки открытых кристаллов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. Т. 2. С. 97–101.
21. Ершова Т.Н., Смирнова, Г.В., Бахин Н.Б., Смирнова Е.Н. Исследование тонкодисперсных порошков серебра для электропроводных клеевых композиций // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. 2014. Вып. 3 (522). С. 61–68.
22. Гладких С.Н., Кузнецова Л.И., Корнев В.В., Барковская Н.П. Токопроводящие клеи разработки ОАО «Композит» // Клеи. Герметики. Технологии. 2009. № 4. С. 8–11.
23. Гладких С.Н., Шестаков А.С., Древаль Т.Н. и др. Токопроводящие клеи для монтажа электроники космического назначения // Печатный монтаж. 2016. № 3. С. 156–160.
24. Гладких С.Н., Шестакова А.С., Колесникова Е.В. Токопроводящие клеи для элементов ЭРИ // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 5. С. 2–4.
25. Токопроводящие клеи (Технические характеристики). URL: www.henkel-adhesives.com (дата обращения: 17.01.2023).
26. Малышева Г.В., Гращенков Д.В., Гузева Т.А. Оценка технологичности использования клеев и клеевых препрегов при изготовлении трехслойных панелей // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 4 (53). С. 26–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-26-30.
27. Большаков В.А., Антюфеева Н.В. Исследование модификации шунгитом углепластика на основе эпоксидной матрицы // Труды ВИАМ. 2018. № 3 (63). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-103-110.
28. Исаев А.Ю., Рубцова Е.В., Котова Е.В., Сутягин М.Н. Исследование свойств клеев и клеевых связующих, изготовленных с использованием современной отечественной компонентной базы // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.01.2023). DOI: 10.18577/2307/6046/2021-0-3-58-67.

29. Волков А.В., Москвина М.А., Карачевцев И.В. и др. Структура и электропроводность высокодисперсных композиций полимера – CuS, получаемых in situ // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 1998. Т. 40. № 6. С. 970–976.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. Materials for aerospace engineering. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
3. Kablov E.N. At the crossroads of science, education and industry. *Ekspert*, 2015, no. 15 (941), pp. 49–53.
4. Grashhenkov D.V., Chursova L.V. Strategy of development of composite and functional materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 5, pp. 231–242.
5. *Aviation materials: a reference book in 13 vols.* Ed. E.N. Kablov. 7th ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2019. Vol. 10: Adhesives, sealants, rubbers, hydraulic fluids. Part 1: Adhesives, adhesive prepreps, 276 p.
6. Petrova A.P., Donskoy A.A. *Adhesive materials. Sealants*. St. Petersburg: Professional, 2008, 589 p.
7. Anikhovskaya L.I., Batizat V.P., Petrova A.P. Adhesives and their application. *Aviation materials at the turn of the XX–XXI centuries*. Moscow: VIAM, 1994, pp. 396–409.
8. Abdullin M.I., Basyrov A.A., Koltaev N.V. et al. Conductive polymer compositions for 3D printing. *Byulleten nauki i praktiki*, 2016, no. 4, pp. 44–50.
9. Aronovich D.A., Varlamov V.P., Voitovich V.A. et al. *Bonding in mechanical engineering: a reference book in 2 vols.* Ed. G.V. Malysheva. Moscow: Nauka i Tekhnologii, 2005, vol. 1, 544 p.
10. Efimov V.A. Climatic resistance of adhesive joints. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2009, no. 6, pp. 6–11.
11. Petrova A.P., Malysheva G.V. *Adhesives, adhesive binders and adhesive prepreps: textbook*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.
12. Petrova A.P., Isaev A.Yu., Lukina N.F., Pavlyuk B.F. Influence of fillers on the electrical conductivity of adhesives and the properties of electrically conductive adhesives. Overview. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2018, no. 8, pp. 9–15.
13. Petrova A.P., Lukina N.F., Pavlyuk B.F., Isaev A.Yu., Besednov K.L. Fillers for conductive adhesives. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2017, no. 5–6 (28), paper no. 06. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: November 30, 2022).
14. Bykov P.M., Egorenkova S.V., Kuzminov A.A. *Operational materials: textbook*. Cherepovets: ChGU, 2013, 340 p.
15. Besednov K.L., Petrova A.P., Lukina N.F., Isaev A.Yu. Influence of the composition and conditions of heat treatment of the conductive properties of silver-containing electrically conductive adhesive compositions (review). Part 1. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-64-77.
16. Lukin V.I., Rulnikov V.S., Afanasiev-Khodikin A.N., Kucevich K.E., Nischev K.N. The method for adhesion strength determining of silver coating to the silicon substrate by glue applying. *Trudy VIAM*, 2015, no. 4, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-12-12.
17. Kurilin S.L. *Electrical materials and technologies of electrical work: allowance at 3 parts*. Gomel: BelSUT. 2008, part 1: Conductor and semiconductor materials, 88 p.
18. Kutsevich K.E., Tyumeneva T.Yu., Petrova A.P. Influence of fillers on properties of adhesive prepreps and PCM on their basis. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-51-55.
19. Lewis A., Babiarz A. Conductive Adhesive Dispensing Process Considerations. *Asymtek, Nordson Electronic Business Group*. Available at: <http://www.asymtek.com> (accessed: January 19, 2023).

20. Ranzhin Yu.S., Kalashnikov Yu.N., Litvinenko N.P. Electrically conductive adhesives for automatic assembly of open crystals. *Elektronika i mikroelektronika SVCh*, 2016, vol. 2, pp. 97–101.
21. Ershova T.N., Smirnova G.V., Bakhin N.B., Smirnova E.N. Investigation of finely dispersed silver powders for electrically conductive adhesive compositions. *Elektronnaya Tekhnika. Ser. 1: microwave technology*, 2014, is. 3 (522), pp. 61–68.
22. Gladkikh S.N., Kuznetsova L.I., Kornev V.V., Barkovskaya N.P. Conductive adhesives developed by JSC «Composite». *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2009, no. 4, pp. 8–11.
23. Gladkikh S.N., Shestakov A.S., Dreval T.N. et al. Conductive adhesives for the installation of space electronics. *Pechatnyy montazh*, 2016, no. 3, pp. 156–160.
24. Gladkikh S.N., Shestakova A.S., Kolesnikova E.V. Conductive adhesives for ERI elements. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2014, no. 5, pp. 2–4.
25. *Conductive Adhesives (Technical Data)*. Available at: www.henkel-adhesives.com (accessed: January 17, 2023).
26. Malysheva G.V., Grashchenkov D.V., Guzeva T.A. Evaluation of technological use efficiency of adhesives and glue prepregs in the manufacture of three-layer panels. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 26–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-26-30.
27. Bolshakov V.A., Antyufeeva N.V. Investigation of the modification shungite of carbon plastic on the basis of epoxy matrix. *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (63), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 17, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-103-110.
28. Isaev A.Yu., Rubtsova E.V., Kotova E.V., Sutyagin M.N. Research of properties of glues and glue binding, made with use of modern domestic component base. *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 25, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
29. Volkov A.V., Moskvina M.A., Karachevtsev I.V. Structure and electrical conductivity of highly dispersed polymer compositions – CuS, obtained in situ. *Vysokomolekulyarnye soyedineniya. Seriya A*, 1998, vol. 40, no. 6, pp. 970–976.

Информация об авторах

Лукина Наталия Филипповна, главный научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Исаев Алексей Юрьевич, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Стародубцева Ольга Александровна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Балабанова Ольга Сергеевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Natalia F. Lukina, Chief Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksey Yu. Isaev, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga A. Starodubtseva, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga S. Balabanova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 15.02.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 27.02.2023.

The article was submitted 15.02.2023; approved and accepted for publication after reviewing 27.02.2023.