

*Н.Ф. ЛУКИНА, Л.А. ДЕМЕНТЬЕВА,
А.П. ПЕТРОВА, А.А. СЕРЕЖЕНКОВ*

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ТЕРМОСТОЙКИЕ КЛЕИ

Эксплуатационная надежность и ресурс клееных конструкций во многом определяются свойствами высокопрочных клеев конструкционного назначения. За годы деятельности лаборатории клеев разработан широкий ассортимент высокопрочных пленочных и пастообразных клеев конструкционного назначения, различающихся по своим прочностным и деформационным свойствам. По некоторым характеристикам эти материалы превосходят зарубежные клеи-аналоги.

Клеи предназначены для изготовления сотовых и слоистых силовых конструкций из металлов и полимерных композиционных материалов. Клеевые соединения обладают высокой длительной прочностью, вибро- и трещиностойкостью, устойчивы к воздействию многочисленных эксплуатационных факторов. Клеи конструкционного назначения обеспечивают следующий уровень прочностных характеристик клеевых соединений: прочность при сдвиге составляет от 25 до 40 МПа, при отслаивании – от 3 до 12 кН/м, относительное удлинение при растяжении – от 40 до 200%. Такое разнообразие свойств клеев дает возможность при разработке нового изделия из всего ассортимента клеящих материалов выбрать те, которые полностью отвечают разнообразным техническим требованиям, предъявляемым к клеевым соединениям [1, 2].

Основными разработками в области клеев конструкционного назначения являются:

– фенолокаучуковые клеи горячего отверждения марок ВК-3, ВК-32-200, ВК-25, ВК-50, которые характеризуются сочетанием высокой эластичности и прочности, что позволяет применять эти материалы при изготовлении сильно нагруженных агрегатов, примером которых являются лопасти несущих и рулевых винтов вертолетов;

– эпоксидные высокопрочные пленочные клеи горячего отверждения марок ВК-31, ВК-41, ВК-36, ВК-51, ВК-51А и их модификации, на базе которых были созданы силовые клееные конструкции с высоким ресурсом, длительным сроком эксплуатации, надежностью и весовой эффективностью для различных типов современных изделий гражданской и военной авиационной и космической техники;

– конструкционные пастообразные клеи холодного отверждения марок ВК-9, ВК-27, отличающиеся по своим свойствам (прочностным, деформационным, температурным) и обладающие повышенной водо- и тропикостойкостью. Клеи нашли применение для изготовления клеевых и клеємеханических (клееклепанных, клеерезьбовых и др.) соединений, в том числе при стапельной сборке планера самолета. Клеевые соединения на их основе эксплуатируются в диапазоне рабочих температур: от –60 до +125°C – длительно, при 200°C в течение 500 ч, при 250°C в течение 5 ч (клей ВК-9); от –60 до +80°C – длительно и при 250°C – кратковременно (клей ВК-27).

При изготовлении сотовых конструкций в сочетании с высокопрочными пленочными клеями широко применяются вспенивающиеся клеи марок ВКВ-9, ВКВ-1, ВКВ-2, ВКВ-3, ВКВ-3Т, ВКВ-27, которые используются для соединения блоков сотового наполнителя между собой и с эле-

ментами каркаса. Эти материалы позволили создать новые типы клееных сотовых и слоистых конструкций, обладающих высокой удельной прочностью, весовой эффективностью, стойкостью к действию вибрационных и акустических нагрузок, повышенным ресурсом и надежностью.

Клеи горячего отверждения марок ВК-37 и ВК-39 для комбинированных соединений позволили создать клееклепаные и клеесварные конструкции с высоким ресурсом и надежностью.

Конструкционные клеи и технологии склеивания с их применением широко внедрены в изделиях ОАО «МВЗ им. М.Л. Миля» – все боевые и гражданские вертолеты (Ми-6, Ми-8, Ми-24, Ми-24В, Ми-26, Ми-26Т, Ми-28, Ми-34 и их модификации), ОАО «Камов» (вертолеты Ка-62, Ка-50, Ка-52, Ка-115, Ка-126 и др.), ФГУП «РСК МиГ» (МиГ-АТ, МиГ-23, МиГ-29, МиГ-31 и др.), ОАО «ОКБ Сухого» (Су-27, Су-29, Су-30МКИ и др.), ФГУП «ЭМЗ им. В.М. Мясищева» (М-103, М-17МР, М-111), ОАО «АК им. С.В. Ильюшина» (Ил-76, Ил-86, Ил-96-300, Ил-96МР, Ил-96МТ, Ил-114 и др.), АНТК им. А.Н. Туполева (Ту-204, Ту-334, Ту-154, Ту-160), АНТКУ им. О.К. Антонова (Ан-72, Ан-77, Ан-124, «Руслан», «Антей»), ОАО «РКК “Энергия”» им. С.П. Королева («Ямал» и др.), ФГУП «ГКНПЦ им. В.М. Хруничева» (международная космическая станция «Мир»).

Решена задача по разработке новых клеев взамен снятых с производства высокопрочных пленочных клеев конструкционного назначения ВК-41 и трудносгораемого ВК-46. Разработан пленочный клей ВК-41М конструкционного назначения, предназначенный для применения в сотовых конструкциях [3]. Сравнительные свойства клеев ВК-41М и ВК-41 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные свойства высокопрочных пленочных клеев

Свойства	Значения свойств клея			
	ВК-41М		ВК-41	
	при температуре испытания, °С			
	20	80	20	80
Предел прочности при сдвиге τ_B , МПа	35	32,6	32,5	25
Предел прочности при расслаивании $S_{рассл}$, Н/мм	3	3	3	2,8
Предел прочности при отслаивании $S_{отс}$, Н/мм	6	6	4	4
Предел прочности при отдире обшивки от сот $M_{отд}$, (Н·мм)/мм	10	–	9	–

Клей ВК-41М характеризуется высокими прочностными свойствами клеевых соединений при температурах от 20 до 80°С после воздействия различных факторов: воды, камеры тропического климата, влажности ($\phi = 98\%$), термостарения.

Взамен клея ВК-46 разработан пленочный трудносгораемый с пониженным дымовыделением клей ВК-46Б конструкционного назначения [4]. Клей ВК-46Б предназначен для склеивания сотовых конструкций из ме-

таллических и неметаллических материалов, в том числе с пониженной горючестью. В табл. 2 представлены сравнительные свойства клеев ВК-46 и ВК-46Б. Клей ВК-46Б классифицируется как самозатухающий, а по дымообразованию относится к 3 группе.

Клеи ВК-41М и ВК-46Б полностью обеспечены отечественным сырьем.

За последние годы проведена работа по разработке конструкционного пленочного клея марки ВК-36РМ с пониженной температурой отверждения 150–160°C (вместо 175–185°C для аналога – клея ВК-36) с сохранением уровня прочности клеевых соединений. Клей ВК-36РМ предназначен для склеивания конструкций, в том числе сотовых, из металлических и неметаллических материалов, работающих в интервале температур от –60 до +150°C.

Таблица 2

**Сравнительные характеристики клеевых соединений
на основе пленочных трудногораемых клеев**

Свойства	Значения свойств клея			
	ВК-46Б		ВК-46	
	при температуре испытания, °С			
	20	80	20	80
Предел прочности при сдвиге τ_b , МПа	35,3	28,2	30	20
Предел прочности при отслаивании $S_{отс}$, Н/мм	6,8	6,3	4,8	4,5
Предел прочности при отрыве $\sigma_{отр}$, МПа	5,8	5,2	5,7	5,0

В табл. 3 представлены прочностные свойства конструкционного клея ВК-36РМ при сдвиге и отрыве при температурах 20 и 150°C, которые находятся на уровне свойств клеевых соединений на основе клея ВК-36.

Расширенными испытаниями установлено, что клеевые соединения на основе клея ВК-36РМ, отверждаемого при пониженных температурах 150–160°C, имеют высокие значения прочности клеевых соединений после длительного воздействия различных факторов (грибостойкость, тропикостойкость, водостойкость, стойкость к воздействию агрессивных сред, термостарение при 150°C в течение 500 и 1000 ч), которые находят-

Таблица 3

Прочностные характеристики* конструкционного пленочного клея ВК-36РМ

Свойства	Значения свойств при температуре испытания, °С	
	20	150
Предел прочности при сдвиге τ_b , МПа	34,0 (31,3–34,5)	19,8 (17,2–22,6)
Предел прочности при равномерном отрыве обшивки от сот $\sigma_{отр}$, МПа	5,0 (4,5–5,4)	3,7 (3,0–4,8)

* В скобках даны минимальные и максимальные значения.

ся на уровне свойств клея ВК-36, отверждаемого при температуре 175–185°C.

Возможность отверждения конструкционного пленочного клея ВК-36РМ при пониженной температуре позволит сократить энергозатраты в 1,5–2 раза при изготовлении конструкций из металлических и неметаллических материалов, в том числе сотовых.

Продолжены работы по созданию конструкционных клеев холодного отверждения. Разработан клей ВК-67М холодного отверждения, который рекомендуется для заполнения зазоров от 0,3 до 0,5 мм между склеиваемыми поверхностями из алюминиевых сплавов, углеродистой стали, полимерных композиционных материалов (стекло- и углепластиков), а также может быть использован как конструкционный клей для склеивания вышеуказанных материалов. Клей работоспособен в интервале температур от –60 до +125°C – длительно (1000 ч), при температуре 150°C – кратковременно, с учетом допустимых эксплуатационных нагревов. Обеспечивает прочность клеевых соединений при сдвиге при температуре испытания: 20°C – не менее 19,0 МПа, при 80°C – не менее 17,6 МПа, при 125°C – не менее 11,0 МПа, при этом уровень прочности клеевых соединений на основе клея ВК-67М при повышенных температурах превосходит аналогичные показатели для ранее разработанных клеев этого класса.

Для оперативного ремонта, в том числе в полевых условиях, деталей и агрегатов из металлических и полимерных композиционных материалов (стекло- и углепластиков), а также для их склеивания рекомендуется быстроотверждающийся эпоксидный клей холодного отверждения ВК-93, работоспособный в интервале температур от –60 до +80°C (длительно). После 5 ч отверждения при температуре $23 \pm 5^\circ\text{C}$ клей обеспечивает начальную прочность клеевых соединений при сдвиге ($\tau_{\text{в}}$) не менее 7,0 МПа, после 24 ч отверждения – не менее 17,5 МПа. Клей может отверждаться по ускоренному режиму при температуре $65 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 1 ч или при температуре $80 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 0,5 ч, удельное давление 0,01–0,1 МПа.

Термостойкие клеи, разработанные в ВИАМ, нашли широкое применение в двигателестроении, изделиях спецтехники, народном хозяйстве и обеспечивают работоспособность клеевых соединений при температурах 300–400°C (длительно) и до температуры 1600°C – кратковременно.

Клеи широко используются для различного назначения:

- ВК-18, ВК-20, ВК-20М – приклеивание теплоизоляционных и теплозащитных материалов с температурой эксплуатации 400°C;
- ВК-54, ВК-58, ВК-69, ВКП-26Ц – изготовление и приклеивание тензорезисторов с рабочей температурой 200–800°C;
- ВКД-1, ВКД-2, ВК-78, ВКП-88Ц, ВК-21 – приклеивание датчиков температуры с рабочей температурой 400–1600°C;
- ВК-54М, ВК-58, ВК-2 – ремонт и уплотнение соединений с температурой эксплуатации до 1250°C;
- ВК-26, ВК-26М, ВК-38 – склеивание магнитопроводов, монтаж кристаллов для работы при температурах 200–400°C;
- ТПК-2 – приклеивание элементов в конструкции нагревательных устройств, эксплуатирующихся при температурах до 1000°C.
- ВК-48, ВК-48М – изготовление оптических пирометров с рабочей температурой до 400°C.

Термостойкие клеи обладают рядом уникальных свойств: карборансодержащие клеи ВК-20, ВК-20М, ВК-48, ВК-48М способны длительно работать при температурах до 400°C, при этом клей ВК-20 выдерживает одновременное воздействие температуры 400°C и агрессивных сред, клей ВК-48М сочетает оптическую прозрачность с термостойкостью при температурах до 450°C. Однокомпонентные низковязкие клеи ВК-26, ВК-26М и ВК-38 работоспособны при температурах 250, 300 и 400°C соответственно, что позволяет использовать их в конструкции приборной спецтехники и магнитопроводов с обеспечением толщины клеевого слоя до 7–10 мкм [5].

Сотрудники лаборатории внесли большой вклад в создание термостойких клеев и отработку технологии склеивания теплозащиты изделия «Буран», при этом самая широкая гамма неметаллических материалов, вся плиточная и другая теплозащита крепились с применением клея-герметика Эластосил 137-175М, что обеспечило надежное крепление ТЗП в процессе полета корабля многоразового использования.

Термостойкие клеи ВК-58 и ВС-350 применяются в конструкции тензорезисторов, использующихся для замера деформации в диапазоне температур от –60 до +300°C в изделиях авиакосмической техники [6].

Решена задача по расширению диапазона рабочих температур клеев, предназначенных для высокотемпературной тензо- и термометрии. Разработан высокотемпературный клей-цемент горячего отверждения ВКП-88Ц, который представляет собой композицию на основе смеси неорганических соединений. Клей-цемент ВКП-88Ц рекомендован для приклеивания рабочих термопар типа ПР 30/6 (платинородий–платинородий) к поверхности образцов из композиционного материала системы С/SiC при проведении стендовых испытаний в окислительной среде при циклическом (до 24 циклов) воздействии температур от 20 до 1440°C (с выдержкой при температуре 1440°C в течение 5 мин). Он также используется для приклеивания рабочих термопар типа ВР (вольфрам–рений) к поверхности образцов из композиционного материала системы С/SiC при проведении стендовых испытаний в вакууме при нагреве до температуры 1600°C с выдержкой при этой температуре в течение 10 мин.

Высокотемпературный клей-цемент ВКП-26Ц горячего отверждения на основе модифицированного кремнийорганического связующего предназначен для крепления проволочной решетки и выводных проводов высокотемпературных тензорезисторов типа ЖЦН-10-120 на деталях ГТД для измерения динамических деформаций в интервале температур от 20 до 800°C*.

Разработан ряд клеев на водной основе. Клей ВК-69 горячего отверждения, представляющий собой водную дисперсию на основе фенолформальдегидного олигомера и модифицирующего полимера. Клей ВК-69 не содержит в своем составе токсичных органических растворителей и по прочностным характеристикам находится на уровне свойств термостойких клеев конструкционного назначения ВС-10Т и ВС-350, содержащих в своем составе токсичный органический растворитель – этилацетат.

Клей ВК-69 внедрен для приклеивания тензорезисторов, для изготовления тензомодулей, применяемых в датчиках давления и сил для исследования напряженного состояния различных конструкций и оборудо-

* Клей-цемент разработан при участии Н.С. Китаевой.

вания, работающих в диапазоне температур от -100 до $+200^{\circ}\text{C}$ и временно при температуре 300°C .

В табл. 4 представлены основные свойства некоторых термостойких клеев.

Таблица 4

Свойства и назначение термостойких клеев

Клеи	Прочность при сдвиге τ_v , МПа		Интервал рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	Особые свойства
	при 20°C	при повышенной температуре		
ВК-48	8,0	2,0 (400°C)	$-60 \div +400$	Оптически прозрачный – Не содержит растворителя
ВК-54	6,0	2,0 (500°C)	$-60 \div +1000$	
ВК-58	14,0	0,5 (500°C)	$-60 \div +500$	
ВК-18	17,5	4,5 (600°C)	$-60 \div +600$	– Одноупаковочный
ВК-26	23,0	6,0 (250°C)	$-60 \div +300$	
ВК-26М	20,0	5,0 (300°C)	$-60 \div +350$	–”–
ВК-69	14,0	7,0 (300°C)	$-60 \div +300$	Содержит воду взамен органических растворителей
ВК-20	16,0	5,0 (400°C)	$-196 \div +400$ (до $+700$ – кратковременно)	Стойкий к воздействию температуры и агрессивных сред
ВК-20М	8,0	3,0 (400°C)	$-196 \div +700$	То же
ВК-78	12,0	5,0 (400°C)	$+20 \div +1400$ (для нитрида бора) $+20 \div +1600$ (для карбида бора)	Не требует специальной подготовки поверхности
ВКД-1, ВКД-2	3,0	1,2 (300°C)	$-60 \div +400$	Эластичные, удлинение 70%
ВКП-26Ц	Не контролируется		$+20 \div +800$	Не выделяют продуктов деструкции
ВКП-88Ц	1,5	–	$+20 \div +1600$	
ВК-21	2,5	1,5 (400°C)	$+20 \div +1600$	То же
ТПК-2	2,5	2,5 (400°C)	$+20 \div +1000$	Экологически чистый. Обеспечивает газонепроницаемость клеевых соединений

В настоящее время ряд термостойких клеев, нашедших применение в изделиях отечественной авиационной техники, оказался в разряде дефицитных из-за прекращения промышленного выпуска исходных компонентов, в том числе олигоэфиркарборана Д-20. В связи с этим разработанные ранее на основе продукта Д-20 термостойкие клеи ВК-20 (горячего отверждения) и ВК-20М (холодного отверждения), применяющиеся для крепления тепло- и звукоизоляционных материалов и для изготовления деталей газогенератора с шумоглушением, выпускаются в ограниченном количестве. Разработаны термостойкие клеи, не содержащие в своем составе олигоэфиркарборан.

Разработан клей ВК-89 горячего отверждения, который в сравнении с аналогом – клеем ВК-20 – характеризуется более высокими прочностными характеристиками клеевых соединений при температурах до 400°C в исходном состоянии и после воздействия различных факторов – агрессивных сред, камеры тропического климата (КТК), воды: при 300–350°C – на 15%, при 400°C – на 53% (при сохранении прочностных свойств при 20°C на уровне свойств клея ВК-20). Клей ВК-89 предназначен для склеивания металлов (углеродистых и коррозионностойких сталей) и неметаллических материалов (стеклопластиков типа СК-9ФА, СК-101 и др.) между собой и в различных сочетаниях. Клей ВК-89 рекомендован к эксплуатации в интервале температур от –60 до +400°C, в том числе при температуре 400°C в течение 5 ч. В табл. 5 представлены свойства клея ВК-89.

Таблица 5

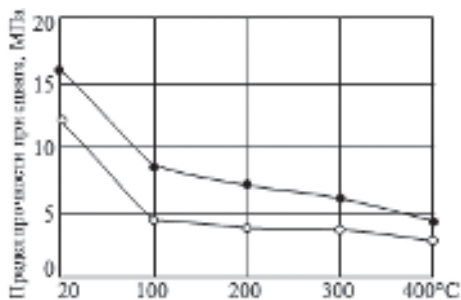
Основные свойства клеевых соединений на основе клея ВК-89

Прочность при сдвиге, МПа, при температуре испытания, °С		Прочность при сдвиге, МПа			
		после воздействия		после термического старения при 400°C в течение 5 ч	
20	400	агрессивных сред	КТК, воды	при температуре испытания, °С	
				400	20
17,0	9,2	9,6	9,0	4,7	6,8

Разработан клей ВК-91 холодного отверждения, который обеспечивает работоспособность клеевых соединений при температурах до 400°C в исходном состоянии и после воздействия различных факторов (агрессивных сред, КТК, воды).

По сравнению с аналогом – клеем ВК-20М – клей ВК-91 обладает повышенной прочностью клеевых соединений при сдвиге при 20°C – на 33%, при 300°C – на 62%, при 400°C – на 48% (см. рисунок).

Клей ВК-91 рекомендуется для склеивания металлов (углеродистых и коррозионностойких сталей и титановых сплавов) и неметаллических материалов (стеклопластиков типа СК-9ФА, СК-101 и др.) и может эксплуатироваться в интервале температур от –60 до +400°C, в том числе при температуре 400°C в течение 5 ч.



Изменение прочности клеевых соединений на основе клеев ВК-91 (●) и ВК-20М (○)

Таким образом, разработан широкий ассортимент клеев (конструкционного назначения и термостойких), которые по своим свойствам находятся на уровне зарубежных материалов, практически не имеют отечественных аналогов и позволяют использовать их при создании изделий новой техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аниховская Л.И., Минаков В.Т.* Клеи и клеевые препреги для перспективных изделий авиакосмической техники / В сб.: *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002*: Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: МИСИС–ВИАМ. 2002. С. 315–326.
2. *Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Авдонина И.А., Тюменева Т.Ю., Жадова Н.С.* Клеи для авиационной техники // РЖХ. 2010. Т. LIV. № 1. С. 46–52.
3. *Дементьева Л.А., Бочарова Л.И., Лукина Н.Ф., Петрова А.П.* Многофункциональные эпоксидные клеи для авиационной техники // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2006. № 7. С. 3–6.
4. *Дементьева Л.А., Тюменева Т.Ю., Шарова И.А.* Клеи с пониженной горючестью для авиационной техники / В сб. трудов VI Международной конф. Вологда. 2011. С. 102–104.
5. *Петрова А.П.* Термостойкие клеи. М.: Химия. 1977. 200 с.
6. *Петрова А.П., Лукина Н.Ф.* Свойства и применение клеев в приборной технике // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2005. № 11. С. 4–10.

*В.В. СЕМЕНЫЧЕВ, Р.К. САЛАХОВА,
Е.В. ТЮРИКОВ, В.А. ИЛЬИН*

**ЗАЩИТНЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ,
ПОЛУЧАЕМЫЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ**

Наиболее широкое применение как в России, так и за рубежом, в качестве защитных и функциональных покрытий получили гальванические покрытия. Особые требования предъявляются к покрытиям, эксплуатирующимся в авиационных конструкциях, что обусловлено недопустимостью коррозии материалов, осыпаемости покрытий, а также установленным ресурсом и календарными сроками эксплуатации авиационной техники, которые постоянно повышаются.

Совершенствование традиционных гальванических покрытий путем оптимизации технологических режимов их нанесения практически исчерпано, и для получения более высоких служебных свойств защитных и износостойких покрытий требуются новые способы их получения.

Стремительно развивающиеся в последнее время нанотехнологии позволили поменять представления о возможностях таких технологических процессов и свойствах получаемых продуктов. Нанотехнологии в области разработки и создания защитных и функциональных покрытий с новым уровнем свойств являются наиболее перспективным направлением в гальванике. Для получения покрытий с улучшенными характеристиками процесс их осаждения проводят в электролитах, содержащих наноразмерные частицы оксидов или карбидов различной природы [1].

В ВИАМ на протяжении последнего десятилетия проводятся исследования, связанные с созданием кластерной гальваники, т.е. технологий с осаждением гальванических покрытий в присутствии наноразмерных частиц. Все разработки защищены патентами на изобретения Российской Федерации, а на технологические процессы выпущена отраслевая нормативная документация в виде технологических рекомендаций, технологических инструкций и директивных технологических процессов.

В качестве объекта исследований выбрана наиболее распространенная в авиации конструкционная сталь 30ХГСА и электролиты-суспензии