

УДК 669.018.95

В.В. Антипов<sup>1</sup>, Е.В. Котова<sup>1</sup>,  
Н.Ю. Серебренникова<sup>1</sup>, А.П. Петрова<sup>1</sup>

## КЛЕЕВЫЕ СВЯЗУЮЩИЕ И КЛЕЕВЫЕ ПРЕПРЕГИ ДЛЯ АЛЮМОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-44-54

*Рассмотрены вопросы, связанные с применением клеевых связующих и клеевых препрегов в составе алюмокомпозитов типа СИАЛ. Приводятся результаты исследований реологических и физико-механических свойств полимерной составляющей СИАЛов: клеевых связующих ВСК-14-1, ВСК-14-2 и ВСК-14-2мР, применяемых в составе клеевых препрегов КМКС-1.80.Т60.37, КМКС-2.120.Т60.37 (или 55) и КМКС-2мР.120.РВМПН.30 на основе стеклянных наполнителей. Показано, что для изготовления клеевых препрегов на основе стекловолокна применительно к слоистым алюмополимерным композиционным материалам оптимальным является клеевое связующее ВСК-14-2мР с пониженной динамической вязкостью, повышенными деформационными и теплопрочностными характеристиками.*

**Ключевые слова:** клеевое связующее, клеевой препрег, содержание связующего, динамическая вязкость, клеевые соединения, прочность при растяжении, слоистый алюмополимерный композиционный материал, СИАЛ.

V.V. Antipov<sup>1</sup>, E.V. Kotova<sup>1</sup>, N.Yu. Serebrennikova<sup>1</sup>, A.P. Petrova<sup>1</sup>

## GLUE BINDERS AND GLUE PREPREGS FOR ALUMOPOLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

*Questions of glue binders and glue prepregs usage in GLARE are discussed. The rheology and stress-strain performance of polymeric parts (glue binders VSK-14-1, VSK-14-2 and VSK-14-2mR used as a part of glue prepregs such as KMKS-1.80.T60.37, KMKS-2.120.T60.37 (or 55) and KMKS-2mR.120.RVMPN.30 based on glass fillers) of GLARE are shown. Investigations shown that the VSK-14-2mR glue binder with low shear viscosity and high stress-strain and hot strength properties is the most suitable for fiberglass roving based glue prepregs fabrication relative to layered alumopolymeric composite materials.*

**Keywords:** glue binder, glue prepreg, binder content, shear viscosity, glue bond, tensile strength, layered alumopolymeric composite materials, GLARE.

---

<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

Полимерные композиционные материалы на основе эпоксидных связующих расплавно-го типа с повышенными деформационными характеристиками и волокнистых наполнителей имеют ряд преимуществ перед цельнометаллическими конструкциями из алюминиевых сплавов, в связи с чем находят все более широкое применение в изделиях авиационной техники [1–3].

В настоящее время для дополнительного снижения массы и повышения ресурсных характеристик авиационных деталей разрабатываются многослойные композиционные

материалы с использованием металлических и полимерных слоев применительно к конструкциям из листовых полуфабрикатов. Практический интерес представляют также слоистые алюмополимерные композиционные материалы на основе алюминиевых листов толщиной 0,3–0,5 мм и полимерного композиционного материала (стеклопластика), сформированного из 2–3 слоев клевого препрега, армированного волокнистым стеклянным наполнителем [4–6].

За рубежом слоистые алюмополимерные композиционные материалы под общей маркой GLARE нашли применение в конструкции самолетов фирмы Airbus в качестве конструкционных материалов для силовых элементов планера (обшивок, стрингеров, противопожарных перегородок фюзеляжа и крыла, панелей пола, стопперов и др.). Благодаря пониженной плотности слоистого материала (в сравнении с алюминиевым сплавом марки 2024) достигнуто снижение массы конструкции на ~500 кг. В сравнении с монолитным сплавом материалы GLARE также обладают повышенными прочностными характеристиками, высоким сопротивлением росту усталостных трещин, устойчивостью к коррозии.

Развивая направление слоистых материалов с целью увеличения их применения в силовых элементах, зарубежные компании Airbus и Alcoa ведут широкие исследования по разработке гибридных конструкций, состоящих из листов алюминиевых сплавов и слоистого алюмопластика GLARE для применения в ответственных деталях, в том числе в панелях крыла самолета.

Сотрудниками ФГУП «ВИАМ» разработаны и исследованы отечественные аналоги материалов GLARE – слоистые алюмопластики класса СИАЛ (С (стеклопластик) И АЛ (алюминий)). СИАЛы представляют собой алюмопластики, при изготовлении которых тонкие алюминиевые листы сочетают с клевыми препрегами на основе стеклотканей, после термообработки которых между алюминиевыми листами образуются прослойки стеклопластика. Сочетание этих материалов в одной конструкции обеспечивает получение уникальной комбинации характеристик материалов этого класса, перспективных для создания авиационной техники нового поколения с повышенными надежностью и ресурсом [7, 8].

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных проблем 15.1. «Многофункциональные клеевые системы» и 6.2. «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

### Материалы и методы

Для проведения исследований применяются следующие материалы.

1. Эпоксидные связующие расплавного типа:

- ВСК-14-1    } ТУ1-595-14-1034–2008;
- ВСК-14-2    }
- ВСК-14-2м – ТУ1-595-12-1475–2014.

2. Клеевые препреги:

- КМКС-1.80.Т60.37 – ТУ1-595-24-452–94;
- КМКС-2.120.Т60.37 (или 55) – ТУ1-595-14-12007–2011;
- КМКС-2мР.120.РВМПН.30 – ТУ1-595-14-954–2006.

В составе клеевых препрегов использовали стеклянные волокнистые наполнители:

- ткань стеклянная конструкционная марки Т60(ВМП)-14 – ТУ6-48-05786904-111–92;
- стеклянный ровинг марки РВМПН-10-У00-14 – ТУ6-48-05786904-142–94.

### Результаты и обсуждение

Слоистые алюмостеклопластики СИАЛ-1 и СИАЛ-3 на основе тонких листов из алюминиевого сплава Д16ч.-АТ и стеклопластика, формирующегося в процессе изготовления СИАЛа из клевого препрега марки КМКС-1.80.Т60.37, стали первыми представителями этого класса материалов. Клеевой препрег изготавливают на основе связующего ВСК-14-1 с теплостойкостью 80°С и волокнистого стеклянного наполнителя – кордной стеклоткани Т60(ВМП)-14 на основе высокомодульного волокна. При разработке первых представителей класса СИАЛов варьировали содержание связующего в клеевом препреге. Установлено, что качественный СИАЛ можно получить с применением препрега КМКС-1.80.Т60 с содержанием клевого связующего 40–50% (объемн.).

В зависимости от направления укладки клевого препрега при изготовлении конструкционного слоистого материала достигается прочность алюмостеклопластика при растяжении в продольном направлении от 600 до 900 МПа по сравнению с прочностью 430 МПа для монолитного алюминиевого сплава Д16ч.-АТ. Снижение плотности алюмополимерного материала до 15% обеспечивается за счет пониженной плотности слоев из среднепрочного алюминий-литиевого сплава марки 1441 с плотностью ~2,60 г/см<sup>3</sup> и входящих в состав гибридного материала клеевых препрегов с низкой плотностью (~1,80–1,95 г/см<sup>3</sup>) [9, 10].

Свойства клеевых соединений алюминиевого сплава Д16-АТ с подготовкой поверхности анодированием в хромовой кислоте, выполненных с применением клевого препрега КМКС-1.80.Т60.37, приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Прочность при сдвиге клеевых соединений Д16-АТ (Ан.Окс.хр)–КМКС-1.80.Т60.37 после воздействия различных факторов

Состояние образцов	Предел прочности при сдвиге, МПа, при температуре, °С	
	20	80
В исходном состоянии	33,0	27,5
После воздействия температуры 80°С в течение, ч:	500	29,0
	1000	27,3
После воздействия условий тропического климата в течение, сут:	30	23,1
	90	15,2
После воздействия влажности φ=98% в течение, сут:	30	23,1
	90	16,3

Слой стеклопластика имеет плотность 1,8 г/см<sup>3</sup>, пористость не превышает 1,0%, гигроскопичность после выдержки в атмосфере с влажностью φ=98% в течение 30 сут составляет 0,35% (по массе), при выдержке в среде с влажностью φ=85% при температуре 60°С гигроскопичность составляет после 30 сут 0,9% (по массе), после 90 сут: 1,02% (по массе).

При выдержке в агрессивных средах в течение 30 сут слой пластика поглощает: 0,186% топлива ТС-1; 0,147% масла ИМП-10; 0,206% гидрожидкости Skydrol LD-4.

Проведены коррозионные испытания алюминиевого сплава Д16-АТ в контакте с отвержденным клеевым препрегом КМКС-1.80.Т60.55. Результаты испытаний показали, что препрег не вызывает коррозии алюминиевого сплава и может быть использован в контакте с алюминиевыми сплавами плакированными анодированными.

Следующим этапом в развитии данного научного направления явилось создание слоистых алюмополимерных композиционных материалов СИАЛ с применением алюминий-литиевого сплава 1441-РДТ11, который в сравнении с алюминиевым сплавом Д16ч.-АТ обладает повышенным модулем упругости ( $E \approx 80$  ГПа), пониженной плотностью  $2,60$  г/см<sup>3</sup> и рекомендован к эксплуатации при температуре до  $130^\circ\text{C}$  вместо  $80^\circ\text{C}$  для алюминиевого сплава Д16ч.-АТ. В связи с использованием теплостойкого алюминий-литиевого сплава 1441-РДТ11 в качестве базового материала для слоистого алюмокомпозитного СИАЛ потребовалось применить в его составе стеклопластик с теплостойкостью  $120^\circ\text{C}$ . В качестве полимерной составляющей в составе СИАЛа выбран клеевой препрег марки КМКС-2.120.Т60.37 на основе эпоксидного клеевого связующего ВСК-14-2 расплавного типа с теплостойкостью  $120^\circ\text{C}$  и стеклоткани Т60(ВМП)-14.

Определение прочностных характеристик клеевых соединений алюминиевого сплава 1441-РДТ11, полученных с использованием клеевого препрега КМКС-2.120.Т60 с содержанием клеевого связующего ВСК-14-2 в препреге 30–37% (по массе), показало высокий уровень деформационных свойств этого связующего: прочность при отслаивании составила  $4,5$ – $5$  кН/м в случае анодирования поверхности сплава в хромовокислотном электролите и  $8,4$ – $9,9$  кН/м в случае подготовки поверхности сплава по методу «Пиклинг».

Плотность стеклопластика, полученного на основе клеевого препрега КМКС-2.120.Т60.37, составляет  $1,78$  г/см<sup>3</sup>, пористость – не более 1,0% (по массе), водопоглощение за 45 сут: 1,2% (по массе). Клеевое связующее не вызывает коррозии алюминиевого сплава 1441. Разработанные на этой основе слоистые алюмокомпозиты СИАЛ-1-1 и СИАЛ-3-1 характеризуются механическими характеристиками на уровне материалов СИАЛ-1 и СИАЛ-3, однако работоспособны в более широком диапазоне температур – от  $-60$  до  $+120^\circ\text{C}$ . Материалы СИАЛ-1-1 и СИАЛ-3-1 также обладают высокими трещиностойкостью, удельной прочностью, стойкостью к усталостным нагрузкам, коррозионной стойкостью и пониженной плотностью ( $2,36$  г/см<sup>3</sup>) [11, 12].

Повышения прочности композиционных материалов типа СИАЛ можно достичь путем использования новых наполнителей в их составе. Анализ полученных данных после комплексных испытаний образцов из алюмокомпозитов типа СИАЛ, в составе которых используются стеклянные волокнистые тканые наполнители, показал, что к недостаткам можно отнести пониженный модуль упругости и недостаточную прочность при растяжении и сжатии из-за искривления нитей основы нитями утка, низкой плотности упаковки стеклянных волокон, в связи с чем невозможно создание стеклопластика с высоким объемным содержанием наполнителя ( $>50\%$ ). Кроме того, ткань Т-60(ВМП)-14 не позволяет варьировать толщину монослоя получаемого стеклопластика и, соответственно, толщину изделия.

Для достижения СИАЛа с применением листов из высокомодульного алюминий-литиевого сплава 1441 уровня прочности при растяжении  $990$  МПа потребовалось решение следующих задач:

- выбор волокнистого наполнителя для стеклопластика;
- разработка и изготовление экспериментальных образцов теплостойкого связующего для клеевого препрега на основе стеклоровинга;
- разработка состава клеевого связующего с определенными реологическими, деформационными и прочностными характеристиками и теплостойкостью  $120^\circ\text{C}$ ;

– разработка технологии изготовления клевого препрега на основе теплостойкого клевого связующего и стекловолокна марки РВМПН-10-400.

За рубежом задача повышения прочностных характеристик гибридных материалов GLARE решается путем применения в их составе препрегов на основе ровинга – однонаправленных высокомодульных стекловолокон. Анализ научно-технической литературы в области создания стеклонеполнителей в виде ровинга для использования в составах слоистых металлополимерных конструкций показал, что основным критерием для получения высокомодульных высокопрочных непрерывных волокон является многофункциональность, т. е. сочетание таких свойств, как прочность, температуроустойчивость, усталостная стойкость, модуль упругости, стойкость к коррозии, старению и т. д.

Этим требованиям удовлетворяют стекловолокна марок ВМД и ВМП, содержащие в своем составе 57–60%  $\text{SiO}_2$ ; 24–26%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 4–9%  $\text{MgO}$ ; 6–10%  $\text{CaO}$ ; 0,4–0,8%  $\text{TiO}_2$ ; 0,07–0,15%  $\text{ZrO}_2$ ; 0,2–0,45%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 0,05–0,3%  $\text{K}_2\text{O}$ ; 0,05–0,3%  $\text{Na}_2\text{O}$ . Прочность таких волокон составляет от 3600 до 4200 МПа, модуль упругости – от 9000 до 9200 МПа. Эти волокна отвечают задачам по созданию высокомодульного и высокопрочного препрега для алюмокомпозитов нового поколения. На основании этих данных использовали отечественный стекловолокно марки РВМПН-10-400.

Стекловолокно марки РВМПН-10-400 состоит из однонаправленных некрученых жгутов из стекла ВМП, линейная плотность которых составляет 400–1900 текс. Жгуты состоят из элементарных волокон толщиной 10 мкм с прочностью с 4500–6000 МПа и модулем упругости >85 ГПа. Использование ровинга с увеличенной плотностью упаковки волокон позволило достичь максимального значения прочностных характеристик полимерного композиционного материала [13, 14].

Полное отсутствие микрповреждений достигается благодаря использованию стеклянного волокнистого наполнителя в виде ровинга в качестве нетканых форм, т. е. предварительно не подвергнутых текстильной обработке. Применение в составе препрега такого наполнителя позволяет достичь максимальных прочностных характеристик однонаправленного композитного материала в изделии.

Высоковязкие клеющие связующие и волокнистые наполнители из однонаправленных некрученых жгутов (ровингов) из стекла ВМП, применяемые в первых СИАЛах, не обеспечивали равномерного нанесения связующего на наполнитель. Из-за этого в отформованном композитном материале наблюдается большое количество макро- и микродефектов, вызывающих повышенную пористость композитного материала и снижение прочностных характеристик изделия. При воздействии вибрационных и акустических нагрузок в процессе эксплуатации также снижается ресурс и надежность работы изделия, т. е. его устойчивость к циклическим нагрузкам не обеспечивается.

Данную проблему можно решить, разработав клеющее связующее для препрега на основе стекловолокна, сочетающее пониженную динамическую вязкость с сохранением повышенных деформационных и теплопрочностных характеристик.

Клеющее связующее расплавленного типа марки ВСК-14-2МР на основе смеси эпоксидных олигомеров и полиарилсульфона определенного строения отвечает всем необходимым требованиям: обладает пониженной динамической вязкостью и оптимальными реологическими (вязкостными) свойствами, что позволяет осуществить качественную пропитку стекловолокна, удовлетворительное смачивание поверхности жгутов стекловолокна по всей границе раздела и равномерное распределение связующего в составе препрега. Соотношение «связующее–стекловолокно» и, соответственно, прочностные характеристики слоев композитного материала применительно к конструкции авиационного

изделия возможно варьировать в широких пределах, добиваясь при этом оптимальных реологических свойств.

В табл. 2 приведены свойства клеевых связующих, разработанных для применения в составе алюмопластиков типа СИАЛ.

Таблица 2

## Свойства клеевых связующих, используемых в составе алюмопластиков СИАЛ

Свойства	Значения свойств связующих		
	ВСК-14-1	ВСК-14-2	ВСК-14-2МР
Предел прочности при сдвиге клеевых соединений алюминиевых сплавов Д16-АТ или Д19-АТ, МПа (не менее), при температуре, °С:			
20	19,6	34,4	20
80	19,5	–	–
150	–	17,6	20
Предел прочности при отслаивании, кН/м (не менее)	4	3,3	4
Температура стеклования, °С	126–130	175–180	173–175
Массовая доля летучих веществ, % (не более)	2	2	2

На рис. 1 представлена температурная зависимость динамической вязкости клеевых связующих ВСК-14-2МР, ВСК-14-2м и ВСК-14-3, которые нашли широкое применение в промышленности. Видно, что динамическая вязкость связующего ВСК-14-2МР изменяется с 50 Па·с при 90°С до 10 Па·с при 120°С, в то время как динамическая вязкость связующего ВСК-14-2м в этом температурном интервале составляет от 451 до 75 Па·с, а связующего ВСК-14-3 – от 160 до 32 Па·с.

Следует отметить существенный разброс значений вязкости связующих при температуре 90°С при различных экспериментах: для связующего ВСК-14-2МР разброс составлял от 42,6 до 50 Па·с, для ВСК-14-2м – от 228 до 451 Па·с, для ВСК-14-3 – от 104 до 160 Па·с.

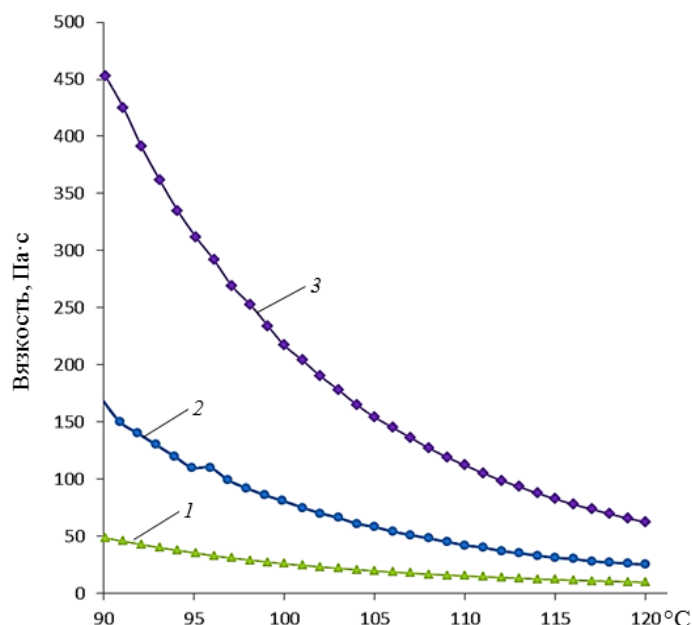


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости клеевых связующих ВСК-14-2МР (1), ВСК-14-3 (2) и ВСК-14-2м (3) от температуры

С целью определения продолжительности переработки связующего (время, в течение которого связующее контактирует с поверхностью наносящих валов в условиях длительного нагрева при постоянной температуре в процессе нанесения на наполнитель) исследовано изменение показателей динамической вязкости клеевого связующего ВСК-14-2МР при температуре 100°C во времени.

Установлено (табл. 3 и рис. 2), что реологические характеристики ( $G'$  и  $G''$ ) клеевого связующего ВСК-14-2МР в течение 3 ч при температуре 100°C меняются незначительно. На графике зависимости динамического модуля упругости  $G'$  и модуля потерь  $G''$  от продолжительности выдержки при температуре 100°C точка пересечения кривых отсутствует (рис. 2), что связано с отсутствием момента гелеобразования и подтверждает возможность переработки клеевого связующего ВСК-14-2МР в препрег.

Таблица 3

**Изменение динамической вязкости клеевого связующего ВСК-14-2МР при продолжительном воздействии температуры 100°C**

Продолжительность выдержки, ч	$G'$ , Па	$G''$ , Па	$G''/G'$	Вязкость, Па·с
0	13	242	18,0	24,0
0,5	15	242	16,7	24,1
1	16	253	16,2	25,2
1,5	17	264	15,1	26,2
2	19	273	14,2	27,2
2,5	21	282	13,7	28,0
3	23	291	12,5	29,0

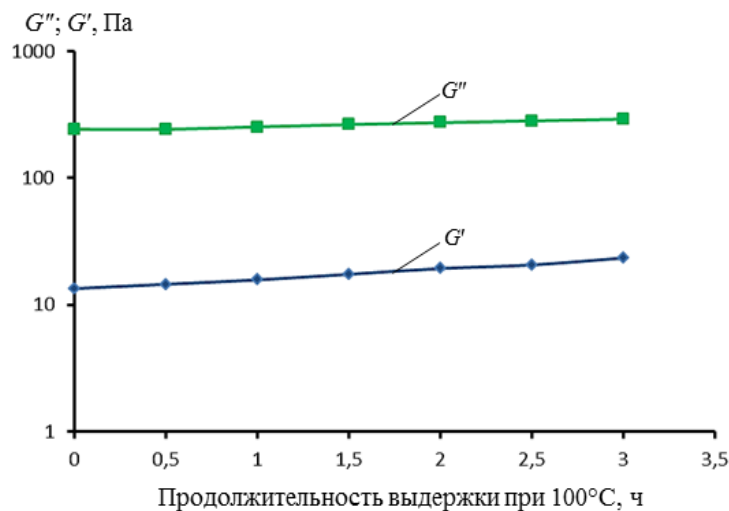


Рис. 2. Характер изменения вязкостных характеристик  $G'$  и  $G''$  клеевого связующего ВСК-14-2МР в процессе длительной выдержки при температуре 100°C

Пониженная вязкость связующего ВСК-14-2МР обеспечивает стабильность показателей клеевого препрега КМКС-2МР.120.РВМПН и стеклопластика, отформованного из него, так как позволяет осуществлять нанесение клеевого связующего на стеклорвинг с наносом, разброс которого составляет 1,5–2%. Свойства стеклопластиков, используемых в составе СИАЛов, представлены в табл. 4.

Следует отметить, что равномерное нанесение клеевого связующего на поверхность стеклорвинга при изготовлении препрега обеспечивается использованием

современного технологического оборудования с такими техническими характеристиками, которые позволяют изготовить препрег с содержанием связующего до 26–30% (по массе) вместо 30–35% (по массе) в клеевых препрегах КМКС-1.80 и КМКС-2.120 на стеклоткани Т-60(ВМП). Повышение значений прочностных характеристик стеклопластика при растяжении до 2000 МПа достигается благодаря применению в составе клеевого препрега стеклоровинга марки РВМПН-10-400 из однонаправленных некрученых жгутов из стекла ВМП с линейной плотностью 400–1900 текс [13, 14]. Свойства клеевых препрегов, используемых для изготовления алюмопластиков СИАЛ, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Свойства стеклопластиков на основе клеевых препрегов

Свойства	Значения свойств клеевого препрега		
	КМСК-1.80.Т60.37	КМКС-2.120.Т60.37	КМКС-2мР.120.РВМПН.30
Диапазон рабочих температур, °С	-60÷+80	-130÷+120	-130÷+120
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,8	1,78	1,95
Предел прочности при растяжении, МПа:			
по основе	620	1325	1980
по утку	335	700	1000
Модуль упругости при растяжении, ГПа:			
по основе	22,0	50,0	63,0
по утку	17,0	12,0	35,0
Предел прочности при сжатии, МПа:			
по основе	520	930	1580
по утку	–	220	1100
Модуль упругости при сжатии по основе, ГПа	30,0	40,0	50,0
Предел прочности при статическом изгибе, МПа:			
по основе	785	1275	2150
по утку	550	130	–
Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	200	200	210
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	75	70	80

Изготовление листовых заготовок из СИАЛа проводят способом автоклавного формования. Сборку пакета осуществляют симметричной ручной выкладкой предварительно раскроенных слоев клеевых препрегов и листов из алюминий-литиевого сплава с подготовленной под склеивание поверхностью. Для обеспечения адгезии клеевого связующего проводят подготовку поверхности листов из алюминий-литиевого сплава, которая включает два последовательных процесса: анодное оксидирование в хромовой кислоте и нанесение защитного адгезионного грунта.

С целью получения наиболее высоких прочностных характеристик СИАЛа поверхность алюминиевых листов предварительно готовили с применением анодного оксидирования. С целью снижения токсичности состава ванны для анодирования без ухудшения качества анодирования разработан специальный комбинированный состав электролита – фосфорно-сернокислотный, не содержащий хромовой кислоты. Разработанный технологический процесс анодирования имеет улучшенные характеристики по экологической безопасности (не содержит токсичных соединений шестивалентного

хрома), обеспечивает получение высоких прочностных характеристик клеевых соединений в составе СИАЛа, а также их антикоррозионную защиту в различных климатических условиях.

Как правило, листовые заготовки из СИАЛа изготавливают способом автоклавного формования. Слои препрега выкладывают вдоль направления проката металлических листов. Соединение препрега в слоях производят встык. Собранный пакет, помещенный в вакуумный мешок, склеивают способом автоклавного формования при давлении от 0,08 до 0,085 МПа. Для повышения однородности распределения клеевого связующего в наполнителе применяют предварительный нагрев собранного пакета. Для уменьшения остаточных напряжений и исключения коробления охлаждение заготовок алюмопластика проводят в автоклаве без снятия давления со скоростью не более 0,5°С/мин до температуры 40°С.

После формования в автоклаве на всех изготовленных листовых заготовках СИАЛа проверяют качество соединения между слоями листов из алюминий-литиевого сплава и стеклопластика с помощью ультразвукового контроля.

В табл. 5 представлены сравнительные характеристики слоистых материалов СИАЛ-1 и СИАЛ-3 с использованием алюминиевого сплава Д16ч.-АТ в сравнении с СИАЛ-1-1, СИАЛ-3-1 и СИАЛ-3-1Р с использованием алюминий-литиевого сплава 1441-РДТ11 пятислойной структуры (рис. 3) [15–19]. Из представленных данных видно, что слоистый алюмополимерный композиционный материал СИАЛ-1-1Р с применением листов из сплава 1441-РДТ11 и клеевого препрега марки КМКС-2мР.120.РВМПН.30 на основе ровинга из высокомодульного стекловолокна (с однонаправленной укладкой наполнителя и укладкой [0°/90°]) по уровню прочностных характеристик превосходит слоистые алюмополимерные композиционные материалы СИАЛ-1 на основе алюминиевого сплава Д16ч.-АТ и клеевого препрега КМКС-1.80.Т60 и СИАЛ-1-1 на основе сплава 1441-РДТ11 и клеевого препрега КМКС-2.120.Т60.37 благодаря использованию в структуре СИАЛ стеклопластика на основе стеклоровинга с повышенной степенью армирования стекловолокнами.

Таблица 5

Основные свойства материалов СИАЛ пятислойной структуры

Материал	Состав СИАЛа		$\sigma_{в}$ , МПа	$E$ , ГПа	$d$ , кг/м <sup>3</sup>	Рабочая температура, °С
	алюминиевый сплав	основа стеклопластика				
СИАЛ-1	Д16ч.-АТ	Клеевой препрег марки КМКС-1.80.Т60.37 на основе клеевого связующего ВКС-14-1 и кордной стеклоткани Т-60 (ВМП)	900	60	2470	80
СИАЛ-3	Д16ч.-АТ		600	55	2470	
СИАЛ-1-1	1441-РДТ11	Клеевой препрег марки КМКС-2.120.Т60.37 на основе клеевого связующего ВКС-14-2 и кордной стеклоткани Т-60 (ВМП)	900	67	2360	120
СИАЛ-3-1	1441-РДТ11		600	64	2360	
СИАЛ-1-1Р	1441-РДТ11	Клеевой препрег марки КМКС-2мР.120.РВМПН.30 на основе клеевого связующего ВКС-14-2мР и ровинга из высокомодульного стекловолокна	990	70	2350	120
СИАЛ-3-1Р	1441-РДТ11		630	64,5	2350	
Алюминиевый сплав	Д16ч.-АТ	–	430	70	2780	80
	1441-РДТ11	–	430	79	2590	~130

Примечание. Технология изготовления клеевого препрега на стеклоровинге разработана сотрудниками ФГУП «ВИАМ» Ю.О. Поповым и Т.В. Колокольцевой.

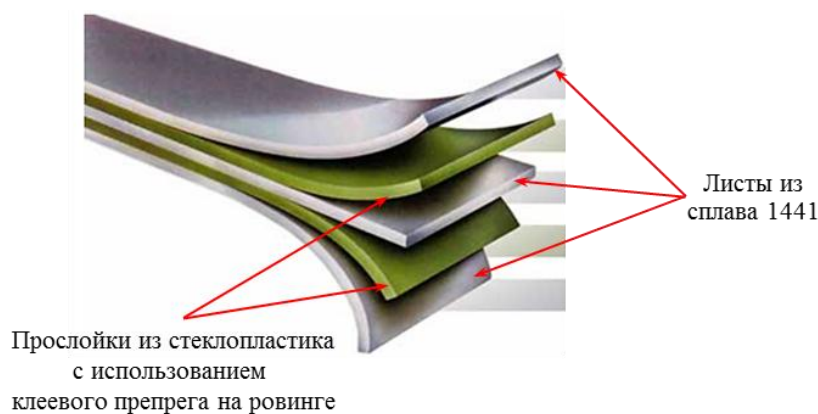


Рис. 3. Структура пятислойного алюмокомпозитного материала типа СИАЛ

### Заключения

Слоистые алюмокомпозитные материалы типа СИАЛ, изготовленные методом автоклавного формования, обладают повышенной прочностью, трещиностойкостью и теплоустойчивостью. У этих материалов есть ряд преимуществ перед монолитными панелями из традиционных алюминиевых сплавов. Во-первых, применение листов из алюминий-литиевого сплава 1441, отличающегося пониженной плотностью и повышенным модулем упругости, позволяет снизить массу элементов деталей. Во-вторых, в конструкции из слоистых алюмокомпозитных материалов усталостная трещина развивается медленнее, чем в монолитных материалах за счет стопперов в виде прослоек из стеклопластика. В-третьих, использование в стеклопластике клеевого препрега, армированного наполнителем из высокопрочных высокомодульных стеклянных волокон, и разработанного клеевого связующего ВСК-14-2МР позволяет увеличить прочность слоистого гибридного материала в направлении выкладки. Это подтверждено результатами испытаний слоистых материалов СИАЛ-1-1Р и СИАЛ-3-1Р.

Композиционные материалы с использованием металлических и полимерных слоев – отечественные алюмокомпозитные материалы СИАЛ – являются перспективными материалами и могут найти применение в конструкциях планера самолетов и вертолетов как основной конструкционный материал – например, в основных (обшивки агрегатов) и во вспомогательных вторичных элементах конструкций (дублиеры обшивок, окантовка дверных проемов, противопожарные перегородки, перекрытия полов) и др.

Преимуществом гибридных материалов являются снижение массы конструкции благодаря пониженной плотности, повышение ресурсных характеристик при повторных нагрузках, увеличение жесткостных характеристик конструкции и технологичности при формообразовании деталей сложных форм. При производстве деталей автоклавным способом происходит совмещение формообразования со склеиванием слоев.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность к.т.н. Н.Ф. Лукиной, оказавшей научную и консультативную помощь в проведении данной работы и предварительном подборе материалов для проведения исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

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. Аниховская Л.И., Минаков В.Т. Клеи и клеевые препреги для перспективных изделий авиакосмической техники // *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: юбил. науч.-технич. сб.* М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 315–326.
3. Хрычев Ю.И., Шкодина Е.П., Магин Н.А. и др. Разработка технологического процесса изготовления радиопрозрачного обтекателя из клеевых препрегов типа КМКС-2м.120 // *Клеи. Герметики. Технологии.* 2013. №2. С. 27–30.
4. Кротов А.С., Старцев О.В., Репин А.В. и др. Сорбция и диффузия влаги в металлополимерных слоистых системах // *Сб. тр. Междунар. конф. «Слоистые композиционные материалы – 98».* Волгоград, 1998. С. 170–171.
5. Кобец Л.П., Деев И.С. Структурообразование в термореактивных связующих и матрицах композиционных материалов на их основе // *Российский химический журнал.* 2010. №1. С. 67–78.
6. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е. Клеевые препреги и слоистые материалы на их основе // *Авиационные материалы и технологии.* 2013. №2. С. 19–21.
7. Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Котова Е.В. Высокопрочные трещиностойкие легкие слоистые алюмокомпозиты класса СИАЛ – перспективные материалы для авиационных конструкций // *Технология легких сплавов.* 2010. №1. С. 28–31.
8. Фридляндер И.Н., Аниховская Л.И., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. и др. Клееные металлические и слоистые металлополимерные композиты // *Машиностроение: энциклопедия в 40 т.* М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / под ред. И.Н. Фридляндера, Е.Н. Каблова и др. С. 814–832.
9. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И., Сидельников В.В., Дементьева Л.А. Слоистые металлополимерные композиты // *Машиностроение: энциклопедия в 40 т.* М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / под ред. И.Н. Фридляндера, Е.Н. Каблова и др. С. 185–195.
10. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмокомпозитов на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана.* 2011. Специальный выпуск: Перспективные конструкционные материалы и технологии. С. 174–184.
11. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Слоистые алюмокомпозиты СИАЛ-1441 и сотрудничество с Airbus и Tu Delft // *Цветные металлы.* 2013. №9 (849). С. 50–53.
12. Каблов Е.Н., Минаков В.Т., Аниховская Л.И. Клеи и материалы на их основе для ремонта конструкций авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии.* 2002. №1. С. 61–65.
13. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е. Свойства и назначение композиционных материалов на основе клеевых препрегов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №8. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-6-6.
14. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Бочарова Л.И., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е., Петрова А.П. Свойства композиционных материалов на основе клеевых препрегов // *Клеи. Герметики. Технологии.* 2012. №6. С. 19–24.
15. Lukina N.F., Dement'eva L.A., Serezhnikov A.A., Kotova E.V. et al. Adhesive prepregs and composite materials on their basis // *Russian Journal of General Chemistry.* 2011. Vol. 81. No. 5. P. 1022–1024.
16. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ерасов В.С., Каширин В.В. Гибридные слоистые материалы на базе алюминий-литиевых сплавов применительно к панелям крыла самолета // *Авиационные материалы и технологии.* 2016. №3 (42). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8.
17. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю. Выбор схемы расположения высококомодульных слоев в многослойной гибридной пластине для ее наибольшего сопротивления потере устойчивости // *Авиационные материалы и технологии.* 2014. №S4. С. 109–117. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-109-117.
18. Лещинер Л.Н., Кишкина С.И., Старова Е.Н., Федоренко Т.П., Булгакова Е.Н. Свойства неплакированных и плакированных листов из сплава 1441 // *Цветные металлы.* 1994. №4. С. 56–59.
19. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. Расчет на прочность гибридной панели крыла на базе листов и профилей из высокопрочного алюминий-литиевого сплава и слоистого алюмокомпозита // *Авиационные материалы и технологии.* 2016. №1 (40). С. 53–61. DOI: 10.185.77/2071-9140-2016-0-1-53-61.