

УДК 621.793.74, 678.067.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННО-НАПЫЛЕННОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ НА АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИК—МЕТАЛЛ

Бабин С.В. *, Фурсов А.А., Егоров Е.Н.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

** e-mail: bsv_sfmai@mail.ru*

Рассмотрен метод повышения прочности на сдвиг и усталостной прочности адгезионного соединения стеклопластика со сплавом на основе алюминия путем создания плазменно-напыленного промежуточного слоя. Исследовалось влияние промежуточных шероховатых слоев на сдвиг и усталостную прочность адгезионного соединения стеклопластика ВПС20 на основе связующего ВС2561 с алюминиевым сплавом АВ-Т1 с помощью фенолкаучукового клея ВК-50, а также влияние на прочность композиционного соединения при непосредственном формовании стеклопластика на алюминии. Проведенная оптимизация параметров композиционного соединения стеклопластик — переходный слой — металл позволила повысить прочность соединения на 90%, усталостную прочность — на 120%.

Ключевые слова: соединение стеклопластик—металл, плазменное напыление, пористое покрытие, адгезионное соединение, композиционный материал, гибридные композиты, упрочнение соединений разнородных материалов.

Введение

В настоящее время в авиации все большее значение приобретают композиционные материалы, в частности стеклопластики и их клеевые соединения с металлами, слоистые алюмостеклопластики, а также гибридные композиционные материалы на основе слоев стеклопластика, титана и алюминия [1, 2]. К таким конструкциям предъявляют повышенные требования по адгезионной и усталостной прочности, импульсной поверхностной нагрузке [3]. В связи с этим исследование метода, позволяющего повысить прочностные характеристики таких материалов, является актуальным.

Постановка задачи

Для получения силовых композиционных авиационных конструкций применяют фенолкаучуковые клеи ВК-3, ВК-25, ВК-50, ВК-51 и др. Данные клеи обеспечивают высокий уровень прочности композиционных конструкций: прочность при сдвиге $\tau_b = 25 \div 40$ МПа, усталостная прочность $\tau_{max} = 10$ МПа [4]. Однако при испытаниях на срез разрушение чаще всего происходит по слою клея, который является слабым звеном данного композиционного материала. Необходимость дальнейше-

го повышения качества и надежности композиционных конструкций требует проведения исследований по упрочнению адгезионных соединений стеклопластик — металл. Целью данной работы являлось исследование возможности упрочнения клеевого соединения стеклопластик — металл путем создания развитой поверхности на металлической составляющей композиционного материала с помощью плазменного напыления. Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- провести экспериментальный выбор материалов для создания промежуточного пористого и шероховатого слоя для упрочнения адгезионного соединения стеклопластик ВПС20 — алюминиевый сплав АВ-Т1;
- исследовать влияние параметров промежуточного слоя на прочностные характеристики композиции и провести оптимизацию его параметров;
- исследовать усталостные характеристики полученного адгезионного соединения.

Материалы и методика эксперимента

Объектом исследования являлось композиционное соединение стеклопластик ВПС-20 — адгезив ВК-50 — алюминиевый сплав АВ-Т1.

На основе анализа литературных данных [5] для формирования переходного слоя была выбрана

группа материалов (см. таблицу). Для выбора из этого ряда материала, обладающего максимальной адгезионной способностью к адгезиву ВК-50, применяемому в данном клеевом соединении, проводили сравнительные испытания прочности клеевого соединения при сдвиге кручением.

Исследование на сдвиг при кручении применяли вследствие того, что при таком способе испытания реализуется наиболее однородное напряженное состояние в клеевом слое, что дает наиболее точную информацию о прочности при сдвиге [6]. Испытания производили на растяжной машине FP-100.

Для преобразования поступательного движения во вращательное использовали шарнирное приспособление. Склеивание образцов осуществляли с помощью пленочного клея ВК-50, температура склеивания составляла 160 °С, давление $3 \cdot 10^5$ Па. Перед склеиванием поверхность промежуточного слоя пропитывалась в вакууме жидким клеем ВК-50 и высушивалась в течение часа при температуре 60 °С, поверхность стеклопластика обрабатывалась шкуркой С1 51С 10-ПСА ГОСТ 10054-82 622. Испытывали по шесть образцов каждого вида покрытия. Для исследований применяли плоские образцы, состоящие из двух склеенных пластин стек-

Результаты сравнительных испытаний прочности клеевых соединений стеклопластик — алюминиевый сплав при сдвиге кручением

№	Особенности подготовки поверхности перед склеиванием	Напряжение сдвига, МПа	Вид разрушения
1	ПН70Ю30+15% шпинель	20,4	0-25% по Al от покрытия, 100-75% по ВК-50
2	ПН70Ю30+20% стекла (порошок)	28,8	70-95% по ВК-50, 5-30% по Al от покрытия
3	ПТ19Н10 под углом 30°	18,2	0% по ВК-50, 100% по Al от покрытия
4	ПН70Ю30+50% Al ₂ O ₃ (сферобаллоны)	17,8	0% по ВК-50, 60% по Al от покрытия, 40% по Al от подслоя ПН70Ю30
5	Al ₂ O ₃ (сферолит)	28,5	95-100% по ВК-50, 0-5% по Al от подслоя ПН70Ю30
6	ЭП741 под углом 30°	25,2	100% по ВК-50
7	ЭП741 под углом 60°	28,5	100% по ВК-50
8	АВ-Т1+анодирование+гр. ЭП214 (стандартная технология)	25,0	30-100% по ВК-50, 0-70% отрыв ЭП214 от анод. пленки
9	ПН70Ю30 под углом 60°	17,9	95-100% по Al от покрытия, 0-5% по ВК-50
10	ПН70Ю30 под углом 30°	17,2	50% по Al от покрытия, 50% по ВК-50
11	ПН70Ю30+10%Al	14,2	100% по Al от покрытия

лопластика и алюминиевого сплава, толщиной 8 мм размером 20×20 мм.

Исследование многофакторного влияния параметров промежуточного пористого слоя на адгезионное соединение проводили с помощью методов планирования эксперимента. Для построения регрессионной модели использовали трехуровневый ортогональный ротационный план первого порядка полнофакторных экспериментов. Оптимизируемый параметр — прочность адгезионного соединения на сдвиг $\tau_{сд}$. Факторы: толщина промежуточного слоя H , шероховатость покрытия R_z , пористость покрытия P .

Усталостные сравнительные испытания проводились на образцах адгезионного соединения с оптимизированным промежуточным плазменно-напыленным слоем и на образцах, полученных по стандартной технологии (анодно-оксидированный сплав АВ-Т1+грунт ЭП214+ВК50+стеклопластик ВПС 20). Испытания образцов проводили по схеме «растяжение-сжатие» на универсальной растяжной машине УРС-1. Использовали асимметричный цикл нагружения с коэффициентом асимметрии 0,1.

Результаты и обсуждение

На основе сравнительных испытаний (см. таблицу) было установлено, что наибольшая прочность клеевого соединения обеспечивается при использовании в качестве переходного слоя следующих материалов:

- алюминид никеля ПН70Ю30 + 20% порошкообразного боросиликатного стекла;
- алюминид никеля ПН70Ю30 + Al_2O_3 (сферолит);
- хромоникелевый сплав ЭП741 напыленный, на плоский образец под углом 60°.

Покрытие из порошка гамма-фазы оксида алюминия (в виде пустотелых сфер — сферолит) также обладает высокой адгезионной способностью к клею ВК-50, однако процесс напыления оксида алюминия проводится при высокой тепловой мощности плазменной струи, что приводит к перегреву подложки и снижению усталостной прочности. Применение оксида алюминия в качестве переходного слоя нецелесообразно, так как требует специальных мероприятий по снижению термического воздействия при напылении на подложку.

Порошки ЭП741 и ПН70Ю30+20% стекла напыляются при относительно низкой мощности плазменного потока и не вызывают в ходе напыления перегрева подложки. По сравнению с ЭП741 механическая смесь порошков ПН70Ю30+20%

стекла обладает менее стабильными адгезионными свойствами, так как стекло в смеси сепарируется, что приводит к неоднородности покрытия по составу и большому разбросу в экспериментальных данных.

Из технологических соображений и для обеспечения стабильности прочности адгезионного соединения сделан вывод, что наиболее приемлемым для создания переходного плазменно-напыленного слоя является порошок ЭП741.

Данные, приведенные в таблице, показывают, что при прочности клеевого соединения 28–30 МПа разрушение происходит преимущественно по клею ВК-50, т. е. прочность соединения определяется когезионной прочностью клея. Следовательно, для того чтобы повысить прочность при сдвиге, необходимо применить более «жесткий» адгезив, например, ВС2561, который используется в качестве связующего при формировании стеклопластика. Как известно, для адгезионных соединений, работающих в условиях динамических нагрузок, рекомендуется применять клей с высокими релаксирующими свойствами и способностью равномерно перераспределять нагрузку по клеевому слою [4]. Поэтому целесообразно заменить клей промежуточным пористым промежуточным слоем, с тем чтобы он выполнял функцию распределения напряжений в клеевом соединении.

С этой целью образцы клеевого соединения (без клея ВК-50) с промежуточным плазменно-напыленным слоем изготавливались одновременно с формированием стеклопластика, т. е. стеклопластик формировался непосредственно на поверхности алюминиевой заготовки с пористым плазменно-напыленным переходным слоем. Пропитку и формирование стеклопластика осуществляли методом «вакуум-давление» с последующей закалкой при температуре $170 \pm 5^\circ C$ в течение 5 часов. Форма образцов и способ испытания прочности адгезионного соединения были такими же, как в предыдущем случае.

Анализ структуры композита (рис. 1–3) и фрактограмм (рис. 2–4) клеевого соединения показал, что прочность связи стеклопластика с поверхностью покрытия определяется полнотой межфазного контакта. Большое количество пустот, представленных белыми фрагментами (см. рис.1), на границе раздела «плазменно-напыленное покрытие — стеклопластик» приводит к тому, что истинная площадь поверхности контакта адгезива (ВС2561) и промежуточного слоя незначительна и составляет 40–60% (см. рис. 2).

Это приводит к низким значениям прочности клеевого соединения ($\tau_{сд} = 17 \div 20$ МПа). Такое со-

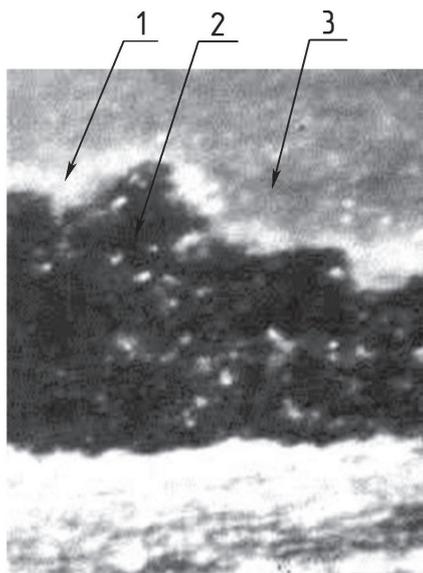


Рис. 1. Структура клеевого соединения: $R_z = 30 \div 40$ мкм; $\tau_{сд} = 17 \div 20$ МПа (1 — поры; 2 — промежуточный слой; 3 — стеклопластик)

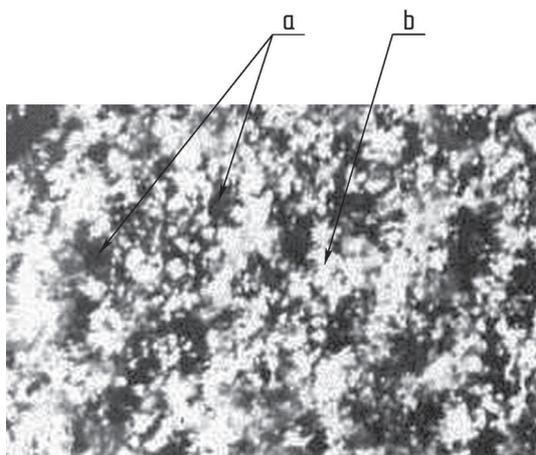


Рис. 2. Поверхность разрушения клеевого соединения: a — несмоченная поверхность промежуточного слоя; b — затвердевший адгезив ВС2561

единение реализуется при шероховатости покрытия ($R_z = 30 \div 40$ мкм). По литературным данным [7], относительно низкая степень шероховатости плазменно-напыленного переходного слоя при пропитке в присутствии высокопористого материала (стеклоткань) не обеспечивает образования полного межфазного контакта. Увеличение шероховатости до 70—80 мкм способствует более полной пропитке покрытия адгезивом и повышению прочности адгезионного соединения до 43—45 МПа (рис. 3 и 4).

Увеличение шероховатости поверхности переходного слоя и температуры пропитки приводит к существенному уменьшению угла смачивания [8], что является необходимым условием формирования полного адгезионного контакта. На пропитку шероховатой поверхности покрытия связующим так-

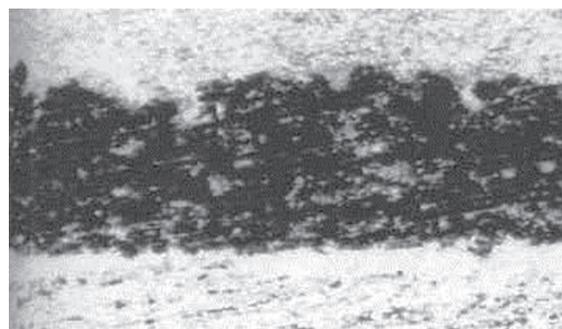


Рис. 3. Срез клеевого соединения. Шероховатость промежуточного слоя $R_z = 70 \div 80$ мкм, $\tau_{сд} = 43 \div 45$ МПа



Рис. 4. Поверхность разрушения клеевого соединения при толщине переходного слоя $H = 0,1 \div 0,2$ мм

же оказывают влияние: скорость пропитки, соотношение сил поверхностного натяжения связующего на покрытия и стеклоткани, время пропитки, толщина покрытия. Таким образом, полнота контакта адгезива и промежуточного слоя, а также прочность клеевого соединения зависят от многих факторов. Получение максимальной прочности адгезионного соединения в условиях многофакторного процесса без привлечения методов планирования эксперимента задача трудоемкая. Поэтому достижение максимальной прочности адгезионного соединения стеклопластик—металл осуществляли путем оптимизации параметров переходного слоя на основе планирования эксперимента и регрессионного анализа экспериментальных данных.

В результате оптимизации были получены зависимости прочности клеевого соединения при сдвиге кручением от пористости, толщины и шероховатости плазменно-напыленного переходного слоя (рис. 5 и 6). Как видно из рис. 5, пористость покрытия не оказывает заметного влияния на прочность соединения, поэтому в регрессионной модели этот фактор не принимался во внимание:

$$\tau_{сд} = 6,7 + 0,4R_z - 8,64H - 0,22R_zH, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где R_z и H — соответственно шероховатость (мкм) и толщина (мм) переходного плазменно-напыленного слоя.

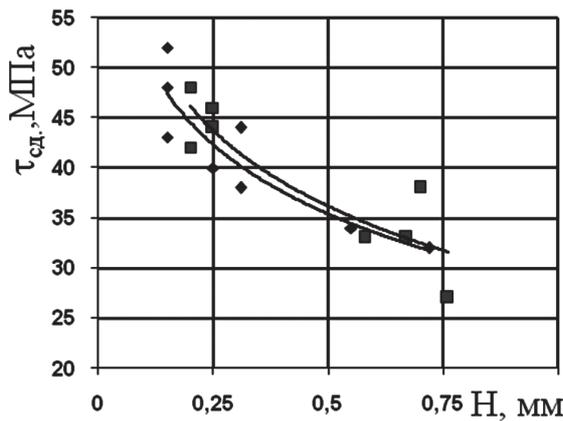


Рис. 5. Зависимость прочности на сдвиг от толщины покрытия и общей пористости

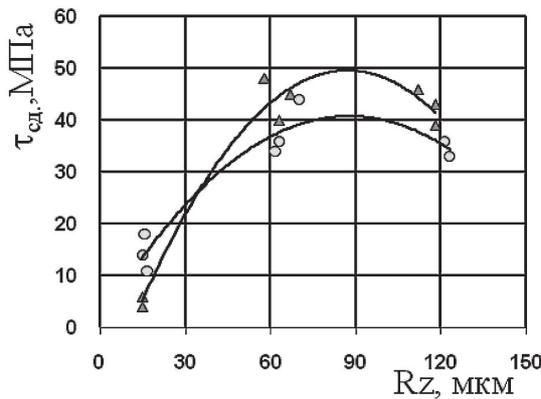


Рис. 6. Зависимость прочности на сдвиг от степени шероховатости поверхности и толщины покрытия

Зависимость прочности адгезионного соединения от шероховатости поверхности покрытия (рис. 6) имеет экстремальный характер. Значение экстремума, полученное экспериментально, достигается при $R_z = 80 \div 90$ мкм. Оптимизированные параметры переходного слоя использовали далее при проведении усталостных испытаний при получении клеевого соединения. В результате были получены диаграммы усталостной прочности различных клеевых соединений (рис. 7). Как видно из диаграмм, усталостная прочность клеевых соединений, выполненных с применением шероховатого промежуточного слоя и клея ВК-50, выше на 60% по сравнению с усталостной прочностью образцов, изготовленных по базовой технологии на основе клея ВК-50 и анодированного алюминиевого сплава.

В рассматриваемом соединении переходный шероховатый пористый слой позволяет:

- увеличить площадь контакта клея с поверхностью покрытия за счет развитости поверхности покрытия;
- использовать эффект «заклинивания» адгезива в поверхностных порах с целью увеличения прочности связи адгезива и металла;

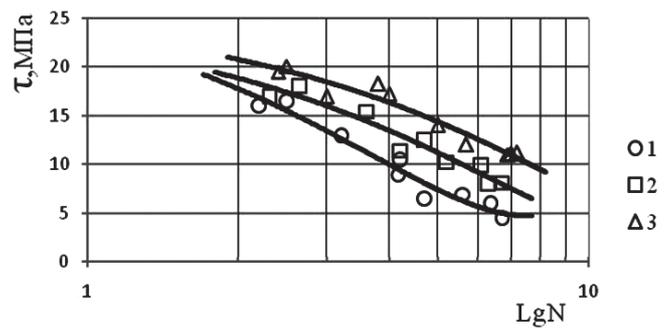


Рис. 7. Диаграмма усталостной прочности клеевых соединений: 1 — сплав АВТ1+грунт ЭП214+ВК50+стеклопластик ВПС 20, $\tau_{сд} = 27$ МПа; 2 — сплав АВТ1+(ПН70Ю30+ЭП741)+ ВК50 +стеклопластик ВПС 20, $\tau_{сд} = 37$ МПа; 3 — сплав АВТ1+(ПН70Ю30+ЭП741)+ стеклопластик ВПС 20, $\tau_{сд} = 47$ МПа

- снизить остаточные напряжения в соединении разнородных материалов за счет более плавного перехода от стеклопластика к металлу.

Это позволяет увеличить несущую способность клеевого соединения. Диаграмма показывает, что с увеличением $\tau_{сд}$ и, соответственно, полноты адгезионного контакта (кривые 1, 2, 3 на рис. 7) наблюдается повышение усталостной прочности на 120%.

Клеевые соединения, выполненные с применением жестких адгезивов, имеют низкую прочность при отрицательных температурах. Замена эластичного клея ВК50 на жесткое и хрупкое связующее ВС2561 потребовала проверки влияния температуры испытаний на прочность композиционных соединений 1, 2, 3, представленных на рис. 7. В результате испытаний получены зависимости прочности на сдвиг клеевого соединения от температуры (рис. 8).

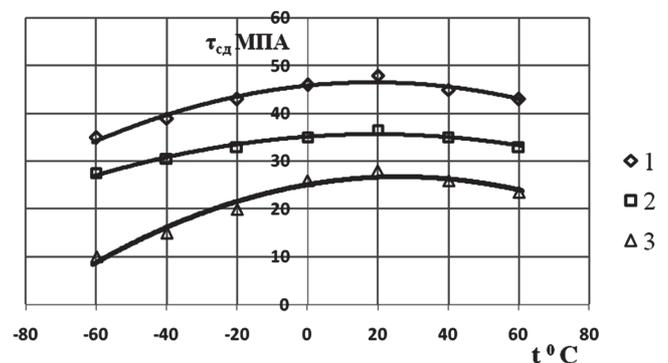


Рис. 8. Зависимость прочности адгезионного соединения при сдвиге кручением от температуры испытаний: 1 — сплав АВТ1+грунт ЭП214+ВК50+стеклопластик ВПС 20; 2 — сплав АВТ1+(ПН70Ю30+ЭП741)+ВК50+ стеклопластик ВПС 20; 3 — сплав АВТ1+(ПН70Ю30+ЭП741)+стеклопластик ВПС 20

С понижением температуры испытания от номинала до 60°C наблюдается уменьшение $\tau_{сд}$ с 50 до 35 МПа. Повышение температуры $t_{исп}$ до 60°C вызывает незначительное уменьшение $\tau_{сд}$ — с 50 до 45 МПа. Общее повышение прочности клевого соединения при изготовлении композиционного соединения с применением промежуточного слоя и связующего ВС 2561 составляет $\approx 90\%$ (рис. 8).

Выводы

1. Применение в адгезионном соединении стеклопластика с алюминиевым сплавом АВ-Т1 промежуточного плазменно-напыленного шероховатого и пористого слоя позволяет повысить прочность клевого соединения примерно на 50% по сравнению с базовой технологией.

2. Формование стеклопластика непосредственно на изделии методом «ваккум-давление» (без клеевой составляющей) дает увеличение прочности до 90%.

3. Применение плазменно-напыленного промежуточного слоя позволяет повысить усталостную прочность соединений стеклопластик—алюминиевый сплав на $\approx 120\%$.

4. Применение жесткого адгезива — связующего ВС2561 — не приводит к снижению прочности адгезионного соединения при низких температурах до -60°C . Температурная кривая « $\tau_{сд} - t_{исп}$ » эквидистантно повторяет кривую базовой технологии, но при более высоких значениях прочности.

5. Применение развитой шероховатой и пористой поверхностей позволяет уменьшить остаточные напряжения в клеевом соединении стеклопластик—металл.

6. Плазменно-напыленный переходный слой из слоев ПН70Ю3 и ЭП741 может быть нанесен на различные металлы, тем самым возможно упрочнение данным методом адгезионных соединений стеклопластиков с различными металлами и сплавами.

Библиографический список

1. Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестов В.В., Митраков О.В., Попов В.И., Ершов А.С. Высокопрочные трещиностойкие лёгкие слоистые алюмопластики класса СИАЛ — перспективные материалы для авиационных конструкций // Технология легких сплавов. 2009. № 2. С. 28-31.
2. Арисланов А.А., Гончарова Л.Ю., Ночовная Н.А., Гончаров В.А. Перспективы использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах // Труды ВИАМ. 2015. № 10. С. 4.
3. Рябов А.А., Романов В.И., Маслов Е.Е., Стрелец Д.Ю., Корнев А.В., Иванов А.И. Сравнительный анализ импульсного деформирования элементов авиационных конструкций из алюминиевого сплава и композитного материала // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. №2. С. 152-161.
4. Петрова А.П. Клеи для авиационной техники. — М.: ВИАМ, 2009. — 17 с.
5. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардамовская Е.Н. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник. — Киев: Наукова думка, 1987. — 543 с.
6. Белый В.А., Егоренков Н.И., Плескачевский Ю.М. Адгезия полимеров к металлам. — Минск: Наука и техника, 1971. — 288 с.
7. Чалых А.Е., Щербина А.А. Переходные зоны в адгезионных соединениях // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. № 8. С. 6-13.
8. Калита В.И., Соколов В.Н., Парамонов В.А. Трехмерные капиллярно-пористые покрытия // Физика и химия обработки материалов. 2004. № 4. С. 55-61.

THE STUDY OF INTERMEDIATE PLASMA-SPRAYED LAYER EFFECT ON FIBERGLASS-METAL JUNCTION STRENGTH

Babin S.V.*, Fursov A.A., Egorov E.N.

Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

* e-mail: bsv_sfmair@mail.ru

Abstract

The study of laminate composite materials, compounds of dissimilar materials and hybrid composite materials for increasing their strength, fatigue strength and reliability is a topical problem for aircraft building.

This work studies the technique for increasing strength of fiberglass with AB-T1 aluminum alloy compound and fatigue strength of hybrid composite material by intermediate layer creation.

To reinforce composite compound intermediate rugged porous layer, obtained by plasma-sprayed method. The paper performed comparative analysis, selected materials and modes to such layer formation. Fatigue testing of hybrid composites samples was carried out. Temperature effect on shear strength of a composite compound was studied. The effect of fiberglass molding process (with glue or without it) on the component's shear strength.

As a result of the conducted studies we found that:

1. The presence of intermediate layer allows increase shear strength of a AB-T1 + (PN70U30 + EP741) + BK50 + VPS fiberglass composite compound up to 50%, and AB-T1 + (PN70U30 + EP741) + VPS composite up to 90%.

2. Implementation of plasma-sprayed intermediate layer allows increase fatigue strength of fiberglass aluminum alloy compounds up to $\approx 120\%$.

3. Implementation of plasma-sprayed intermediate layer ensures workability of hybrid composite materials under consideration at temperatures from -60°C to $+60^{\circ}\text{C}$. The temperature profile " $\tau_{sh} - t_{isp}$ " repeats equidistantly the curve of basic technology, but at higher strength values.

The results of the study can be used for new composite materials development and hardening adhesive compounds of dissimilar materials. For example, to develop hybrid composites titanium fiberglass aluminum alloy, and new SIAL variants for fiberglass aircraft propeller blades design, compressor and turbine blades for gas- turbine engines.

Keywords: glass-reinforced plastic-metal compound, plasma-sprayed coating, porous coating, adhesion coupling, composite material, hybrid composites, dissimilar materials compound hardening.

References

1. Senatorova O.G., Antipov V.V., Lukina N.F., Sidel'nikov V.V., Shestov V.V., Mitrakov O.V., Popov V.I., Ershov A.S. *Tehnologija legkih splavov*, 2009, no. 2, pp. 28-31.
2. Arislanov A.A., Goncharova L.Yu., Nochovnaya N.A., Goncharov V.A. *Trudy VIAM*, 2015, no. 10, p. 4.
3. Ryabov A.A., Romanov V.I., Maslov E.E., Strelets D.Yu., Kornev A.V., Ivanov A.I. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 152-161.
4. Petrova A.P. *Klei dlya aviatsionnoi tekhniki* (Glues for the aircraft equipment), Moscow, VIAM, 2009, 17 p.
5. Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L., Ardatovskaya E.N. *Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovykh materialov: Spravochnik* (Thermal spray coatings from powder materials: a Handbook), Kiev, Naukova dumka, 1987, 543 p.
6. Belyi V.A., Egorenkov N.I., Pleskachevskii Yu.M. *Adgeziya polimerov k metallam* (Adhesion of polymers to metals), Minsk, Nauka i tekhnika, 1971, 288 p.
7. Chalykh A.E., Shcherbina A.A. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2005, no. 8, pp. 6-13.
8. Kalita V.I., Sokolov V. N., Paramonov V.A. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2004, no. 4, pp. 55-61.