

## **Выбор способа крепления частей композитных силовых шпангоутов хвостовой части фюзеляжа легкого самолета**

© Тун Лин Хтет, П.В. Просунцов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

*Рассмотрены различные варианты крепления между собой частей композитных силовых шпангоутов из полимерных композиционных материалов — клеевое и комбинированное клеомеханическое соединения. Основное внимание уделено сравнительному анализу указанных типов соединений с точки зрения их эффективности, технологичности, а также влияния на прочностные характеристики и общую массу конструкции. В качестве нагрузок было исследовано воздействие аэродинамических и массово-инерционных сил на самолет при различных расчетных случаях. С использованием программного комплекса ANSYS Workbench проанализировано напряженно-деформированное состояние силовых шпангоутов. По результатам анализа предложен рациональный способ крепления композитных частей шпангоутов, обеспечивающий снижение веса конструкции при сохранении достаточной прочности и надежности сборных элементов. Оценка прочности силовых шпангоутов выполнена с учетом их коэффициента запаса по критерию разрушения композиционных материалов.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, углепластик, клеевое соединение, клеомеханическое соединение, силовые шпангоуты, силовой набор, фюзеляж

**Введение.** В настоящее время композиционные материалы (КМ) особенно востребованы для применения в авиационной и космической технике благодаря уникальной удельной прочности, удельной жесткости, а также высоким физико-механическим характеристикам [1]. Наиболее широко используются полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые состоят из полимерной матрицы, армированной волокнами (обычно стеклянным, углеродным и арамидным). Основное преимущество ПКМ перед металлами заключается в том, что они позволяют снизить вес конструкции при сохранении ее прочности, а это может привести к значительной экономии производственных затрат [2]. Однако эффективность применения ПКМ в конструкции летательных аппаратов (ЛА) во многом зависит от качества их соединений, поскольку большинство разрушений конструкций из ПКМ происходит именно в зоне соединений [3].

Соединения КМ всех видов можно условно разделить на три класса: адгезионные (клеевые), механические, комбинированные (клеомеханические) [3]. Клеевые соединения все чаще становятся альтернативой механическим в композитных конструкциях самолетов для авиации общего назначения (АОН), поскольку они обладают рядом

преимуществ по сравнению с обычными механическими крепежными элементами. Клеевые соединения не повреждают склеиваемые элементы и, следовательно, не создают концентрацию напряжений и разрыв волокон КМ. Они обеспечивают равномерное распределение напряжений по всей зоне соединения, более высокую жесткость соединения и несущую способность, что дает возможность снизить вес конструкции [4]. Однако клеевым соединениям свойственны и недостатки: ограничение толщины соединяемых деталей, необходимость строго контролировать процесс подготовки поверхности, а также продолжительный процесс отверждения [5].

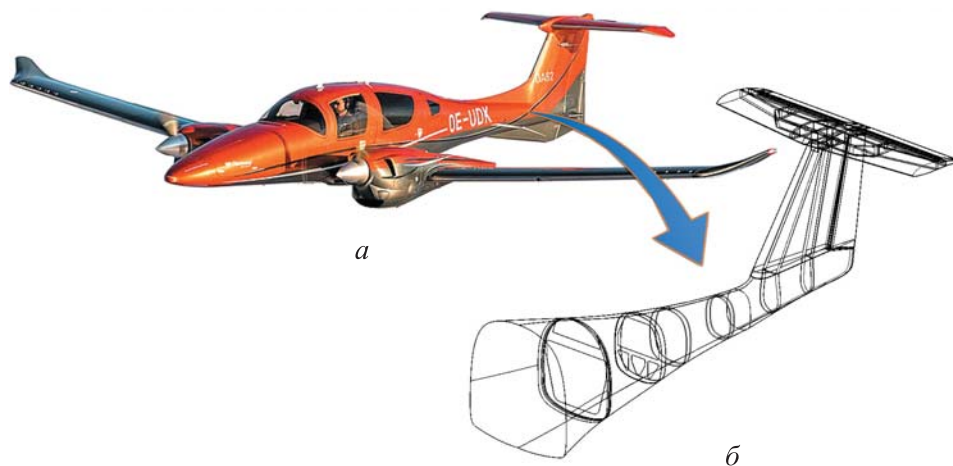
Механическое соединение с помощью болтов или заклепок широко распространено в аэрокосмической промышленности. К преимуществам механических соединений относятся возможность обеспечения заданной прочности непосредственно после сборки, возможность их разборки, и кроме того, низкие затраты на оборудование. Хотя во многих случаях механическое соединение и является предпочтительным методом соединения, оно все же не лишено недостатков. В частности, вблизи отверстий для крепежных элементов могут возникать концентрации напряжений, что способно привести к повреждению соединяемых деталей [3].

Повышение надежности и прочности соединений несущих элементов конструкций из ПКМ можно обеспечить при совместном применении клея и механических элементов крепежа, т. е. в результате комбинированного соединения. Такое сочетание клеевого и механического соединений позволяет устранить недостатки, присущие обоим способам соединений [3].

Цель данной работы — расчетно-теоретическое обоснование выбора способа крепления композитных элементов шпангоутов с учетом их прочности и надежности.

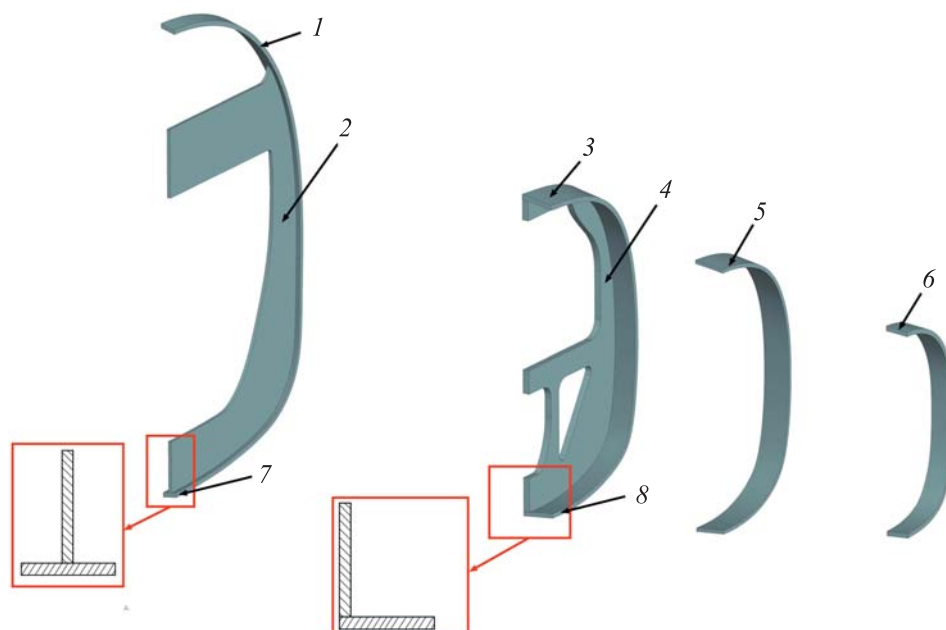
**Объект исследования.** Наряду с крылом важную роль в конструкции ЛА играет фюзеляж, в котором располагаются экипаж, пассажиры, грузы и дополнительное оборудование. В фюзеляже размещается до 70 % полезной нагрузки [6]. Поэтому в качестве объекта исследования был выбран силовой набор хвостовой части фюзеляжа легкого самолета DA-62, который представляет собой моноплан с низкорасположенным свободнонесущим крылом и Т-образным хвостовым оперением [7].

Фюзеляж самолета DA-62 — это полумонокок, состоящий из обшивки и четырех шпангоутов (рис. 1) [7]. Обшивка выполнена из двух частей, обеспечивающих передачу нагрузок к силовой конструкции, которые соединяются друг с другом в вертикальной плоскости симметрии в верхней и нижней частях фюзеляжа. Шпангоуты фюзеляжа крепятся к обшивке с помощью клеевого соединения [7].



**Рис. 1.** Легкий самолет DA-62 (а) и композитная конструкция хвостовой части его фюзеляжа (б)

Силовой набор хвостовой части фюзеляжа был разработан с использованием комбинации методов топологической и двухэтапной параметрической оптимизации, изложенных в работах [8–10]. Этот набор состоит из четырех шпангоутов [9], среди которых 1-й и 2-й шпангоуты имеют круговые и вертикальные части (рис. 2).



**Рис. 2.** Сечение конструкции силового набора фюзеляжа:

1 и 2 — круговая и вертикальная части 1-го шпангоута; 3 и 4 — круговая и вертикальная части 2-го шпангоута; 5 — 3-й шпангоут; 6 — 4-й шпангоут; 7 — Т-образное соединение; 8 — L-образное соединение

Для того чтобы повысить прочность соединения и обеспечить эффективную передачу нагрузки между двумя частями шпангоута в углах Т-образной конструкции 1-го шпангоута предусмотрены два угловых усиления и одно — в L-образном соединении 2-го шпангоута.

**Физико-механические характеристики используемого материала.** Поскольку композитные силовые шпангоуты хвостовой части фюзеляжа легкого самолета являются высоконагруженными элементами конструкции, для их изготовления был применен углепластик на основе углеродной ткани GG-200T и эпоксидной смолы [8–10]. Физико-механические характеристики углепластика, используемого в силовых шпангоутах, приведены ниже [10]:

Модуль упругости, ГПа:	
в направлении-1 $E_1$ .....	51,65
в направлении-2 $E_2$ .....	50,82
в направлении-3 $E_3$ .....	8,46
Модуль сдвига $G_{12}$ , ГПа .....	3,742
Предел прочности при растяжении, МПа:	
в направлении-1 $\sigma_{1r}$ .....	520
в направлении-2 $\sigma_{2r}$ .....	520
в направлении-3 $\sigma_{3r}$ .....	50
Предел прочности при сжатии, МПа:	
в направлении-1 $\sigma_{1c}$ .....	450
в направлении-2 $\sigma_{2c}$ .....	450
в направлении-3 $\sigma_{3c}$ .....	150
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> .....	0,18
Толщина монослоя $t$ , мм .....	0,26

**Методология исследования.** Процесс изготовления 1-го и 2-го шпангоутов — сложная техническая задача, поскольку необходимо, с одной стороны, обеспечить надежное механическое крепление частей друг к другу, с другой — согласовать схему укладки двух частей шпангоутов. Однако изготовление 1-го и 2-го шпангоутов как единого целого методом намотки или выкладки невозможно из-за различия схем укладки вертикальной и круговой частей. Поэтому было принято решение изготавливать части 1-го и 2-го шпангоутов по отдельности.

Для многослойных композитных силовых шпангоутов используются схемы укладки углепластика, полученные в результате параметрической оптимизации в работах [8–10]:  $[\pm 45^\circ]_9$  и  $[0^\circ]_{24}$  для круговой и вертикальной частей 1-го шпангоута;  $[0^\circ]_{20}$  и  $[\pm 45^\circ]_{10}$  для круговой и вертикальной частей 2-го шпангоута;  $[\pm 45^\circ]_{17}$  и  $[\pm 45^\circ]_{22}$  для 3-го и 4-го шпангоутов соответственно.

Были рассмотрены различные варианты крепления частей силовых шпангоутов — клеевое и клеомеханическое, являющиеся наиболее распространенными для соединений деталей из ПКМ между собой [11]. Для создания прочного и эффективного соединения частей

композитной конструкции необходимо проанализировать распределение напряжений в сборке с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

Для выбора способа крепления частей силовых шпангоутов фюзеляжа было проведено моделирование их напряженно-деформированного состояния в программном пакете ANSYS Workbench. В качестве нагрузок, действующих на конструкцию фюзеляжа, рассматривались аэродинамические нагрузки, распределенные по его поверхности, массово-инерционные нагрузки, создаваемые весом как самого фюзеляжа, так и расположенных в нем агрегатов, силы, передающиеся на фюзеляж от крыла и оперения самолета, и силы избыточного давления в герметических кабинах фюзеляжа.

**Клеевое соединение.** К клеям, используемым для соединения деталей из ПКМ в авиационной промышленности, относятся эпоксидные смолы, цианоакрилаты, анаэробные, акриловые, полиуретаны, силиконы, высокотемпературные клеи и др. [11–13]. Клеи этих типов имеют как уникальные преимущества, так и ограничения, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации авиационных конструкций. Правильный выбор клея обеспечивает оптимальное сочетание прочности, устойчивости к эксплуатационным нагрузкам и долговечности конструкции. Типичные физико-механические характеристики клеев разных типов представлены в табл. 1 [11–13].

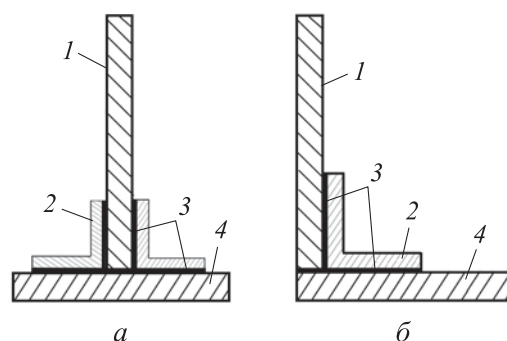
Таблица 1

**Физико-механические характеристики клеев, используемых для соединения ПКМ**

Клей	Модуль упругости $E$ , МПа	Модуль сдвига $G_{12}$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$	Предел прочности, МПа	
				при растяжении $\sigma_u$	при сдвиге $\tau_{12}$
Эпоксидный	1820	1559	0,34	31,5	30
Акриловый	896	159	0,4–0,49	32,1	8,4
Полиуретановый	1–2	0,7	0,4–0,48	2,5–3,5	4,5
Силиконовый	0,5–2	0,68	0,48–0,495	1,2	1,3

Для создания клеевого соединения была выбрана эпоксидная смола, обеспечивающая хорошую совместимость и адгезию к КМ [13]. Клеевые слои расположены между угловыми усилениями и вертикальными и круговыми частями шпангоутов, а также между круговыми частями и обшивкой фюзеляжа (рис. 3).

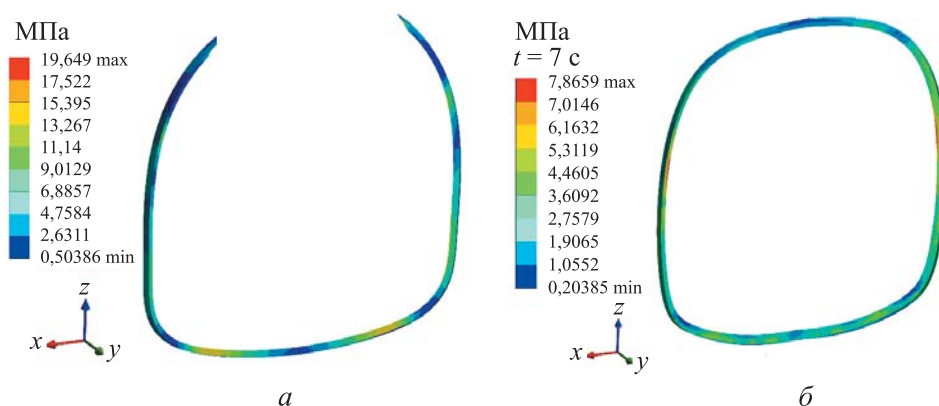
Толщина клеевых слоев в местах соединений композитных частей шпангоутов составляет 0,2 мм. Масса клеевых слоев в соединениях 1-го и 2-го шпангоута — 39,18 г и 19,83 г соответственно, что в сумме дает 59,01 г. Суммарная масса силовых шпангоутов при использовании клеевого соединения достигает 8,136 кг.



**Рис. 3.** Клеевое Т-образное соединение в 1-м шпангоуте (а) и L-образное соединение во 2-м шпангоуте (б):

1 — круговая часть шпангоута; 2 — угловое усиление; 3 — клеевые слои; 4 — вертикальная часть шпангоута

Был проведен расчет напряженно-деформированного состояния шпангоутов при наложении ограничения на напряжения ( $[\sigma_{\max}] = 175$  МПа) в них с учетом коэффициента безопасности  $f = 2,5$ . Распределение напряжений в клеевых слоях 1-го и 2-го шпангоутов представлено на рис. 4. Видно, что максимальное значение напряжений, возникающих в клеевых слоях в соединениях композитных частей 1-го и 2-го шпангоутов, составляет 19,649 МПа.



**Рис. 4.** Распределение напряжений в клеевых слоях, МПа, 1-го (а) и 2-го (б) шпангоутов

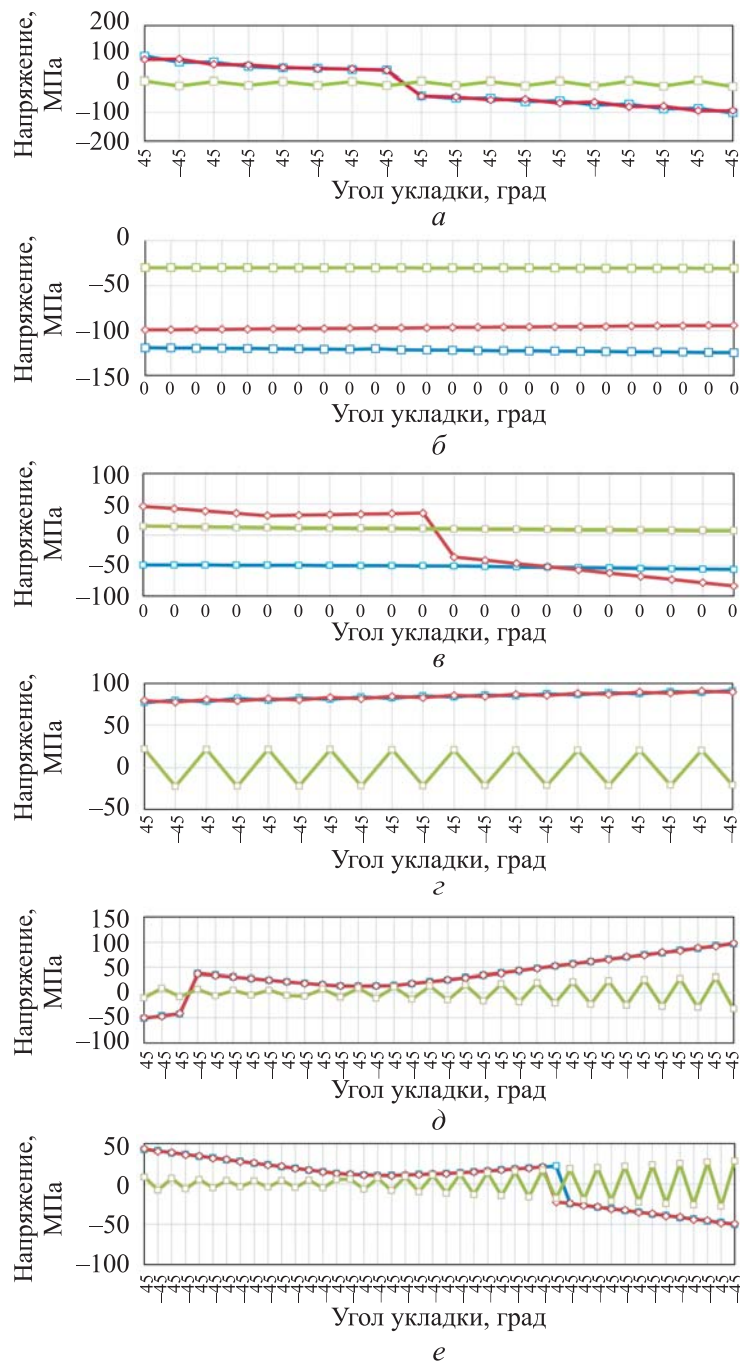
Масса частей шпангоутов и максимальные растягивающие и сжимающие напряжения, возникающие в них при использовании клеевых соединений, приведены в табл. 2. Согласно данным табл. 2, при использовании клеевого соединения максимальные сжимающие напряжения возникают в вертикальной части 1-го шпангоута ( $-142$  МПа). При этом максимальные напряжения в клеевых соединениях достигают 12,5 МПа, что не превышает соответствующего допустимого значения.

**Масса шпангоутов и напряжения, возникающие в них  
при использовании клеевых соединений**

Часть шпангоута	Масса, кг	Максимальное напряжение, МПа		
		растягивающее $\sigma_t$	сжимающее $\sigma_c$	сдвиговое $\tau_c$
<i>Первый шпангоут</i>				
Круговая часть	0,698	110,29	-103,84	67,33
Вертикальная часть	2,043	96,925	-141,76	70,95
Левое угловое усиление	0,18	80,502	-57,504	59,89
Правое угловое усиление	0,152	63,952	-49,15	41,52
Клеевые слои	0,039	10,955	-12,578	11,32
<i>Второй шпангоут</i>				
Круговая часть	1,144	60,676	-79,863	53,51
Вертикальная часть	1,104	126,32	-50,503	63,16
Угловое усиление	0,179	45,633	-119,86	73,92
Клеевые слои	0,0199	5,239	-7,7256	4,19
<i>Третий шпангоут</i>				
—	1,501	114,29	-84,194	56,89
<i>Четвертый шпангоут</i>				
—	1,081	58,8	-72,841	46,42

Несмотря на то что все слои многослойного композитного пакета подвергаются одинаковым нагрузкам, напряжения могут варьироваться от слоя к слою в зависимости от их ориентации. Распределение главных напряжений в слоях силовых шпангоутов при использовании клеевых соединений показано на рис. 5. Видно, что максимальное напряжение в каждом слое не превышает допустимое значение [ $\sigma_{max}$ ].

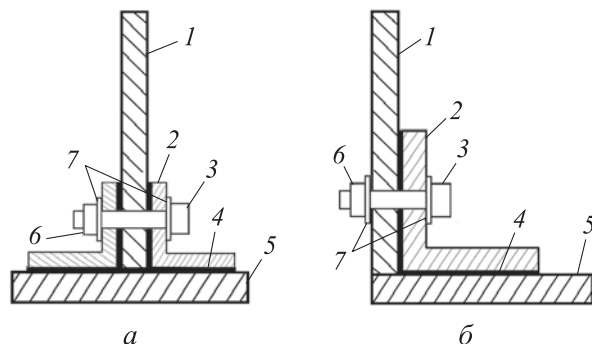
**Клеемеханическое соединение.** В качестве альтернативы рассмотрим схему комбинированного клеємеханического соединения для повышения требований к прочности и надежности соединений композитных силовых шпангоутов. Клеемеханическое соединение обеспечивает одновременную передачу нагрузки через клеевые слои и болты, каждый из которых имеет свою жесткость [3, 14]. Предполагается, что за счет распределения нагрузки, передаваемой через болтовое соединение и клеевые слои, прочность комбинированного соединения повысится. Схемы совместного использования болтового и клеевого соединения вертикальной и круговой частей шпангоутов вместе с угловыми усилениями представлены на рис. 6.



**Рис. 5.** Распределение главных напряжений в слоях силовых шпангоутов:

$\sigma_1, \sigma_2$  — напряжения в слое УП вдоль ( $\square$ ) и поперек ( $\diamond$ ) волокон соответственно, МПа;  $\tau_{12}$  — касательное напряжение ( $\square$ ) в слое УП, МПа; круговая (а) и вертикальная (б) части 1-го шпангоута; (в) и (г) — то же для 2-го шпангоута; (д) и (е) — для 3-го и 4-го шпангоутов соответственно





**Рис. 6.** Клеемеханическое Т-образное соединение 1-го шпангоута (а) и L-образное соединение 2-го шпангоута (б):

1 — круговая часть шпангоутов; 2 — угловое усиление; 3 — болт; 4 — клеевой слой;  
5 — вертикальная часть шпангоутов; 6 — гайка; 7 — шайбы

В зависимости от толщины соединяемых частей шпангоутов для 1-го шпангоута выбраны болты М8×1,25×18, для 2-го — болты М5×1,25×14. При выборе материалов для болтов рассматривались титановый сплав Ti-6Al-4V и алюминиевый сплав Al 7075-T73 как наиболее распространенные для изготовления болтовых соединений, используемых в конструкциях из углепластика [15, 16]. Физико-механические характеристики материалов болтов представлены в табл. 3 [15, 17].

Таблица 3

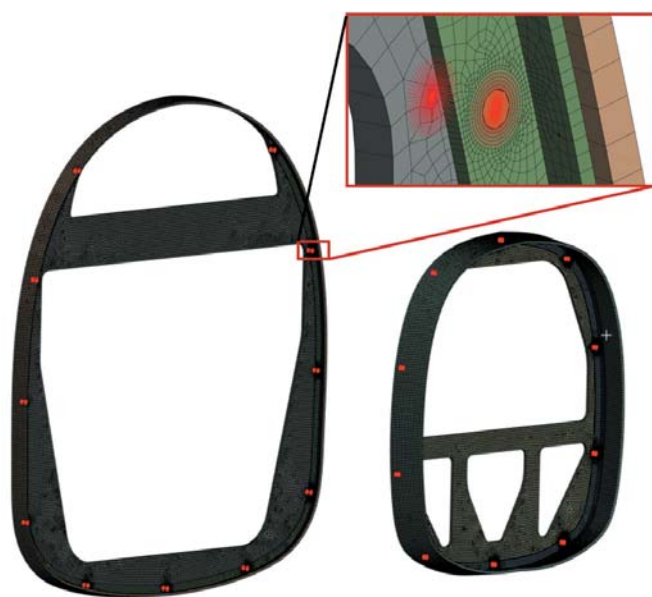
**Физико-механические характеристики материалов болтов**

Параметр	Сплав	
	Ti-6Al-4V	Al 7075-T73
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	4405	2810
Модуль упругости $E$ , ГПа	113,8	72,0
Модуль сдвига $G_{12}$ , ГПа	43,0	26,9
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,323	0,33
Предел прочности на растяжение $\sigma_b$ , МПа	950	505
Предел прочности на сдвиг $\tau$ , МПа	550	300
Разрушающая деформация $\epsilon$ , %	36	13

Однако следует учитывать, что при использовании крепежных элементов из алюминиевого сплава необходимо принимать меры по предотвращению образования электрохимической пары между углепластиком и алюминием [15–17], а именно наносить покрытия на поверхности крепежных элементов или использовать прокладки из стеклопластика. Общая масса силовых шпангоутов при использовании

клеемеханического соединения с болтами из алюминиевого сплава составила 8,1 кг, а из титанового — 8,15 кг.

Для анализа напряженно-деформированного состояния соединения была построена конечно-элементная модель (КЭМ) конструкции хвостовой части фюзеляжа с использованием метода Beam bolts (рис. 7), в случае применения которого не требуется задавать геометрию болта, гайки и шайбы, что существенно упрощает расчетную модель [18].



**Рис. 7.** Моделирование соединения частей 1-го и 2-го шпангоутов с использованием элементов Beam bolts (выделены красным цветом)

В 1-м шпангоуте равномерно по периферии установлено 11 болтовых соединений, интервал между которыми составляет 250 мм. Во 2-м шпангоуте расположено 10 болтовых соединений на расстоянии 220 мм.

Для сравнения в табл. 4 представлены максимальные напряжения, возникающие в композитных частях силового набора фюзеляжа при использовании клеемеханических соединений с помощью болтов из различных материалов.

Результаты анализа напряженно-деформированного состояния шпангоутов показывают, что максимальное значение напряжений в композитных шпангоутах при использовании клеемеханических соединений составляет  $-136$  МПа, что незначительно отличается от случая просто клеевых соединений. При этом напряжения в болтах из титанового сплава выше, чем из алюминиевого сплава. Однако можно сделать вывод о том, что предпочтительнее использовать для

изготовления болтов титановый сплав, обладающий в 2 раза большей прочностью при растяжении и сдвиге, чем алюминиевый. При этом напряжения в клеевых слоях достигают до 10 МПа, что не превышает допустимых значений для эпоксидного клея.

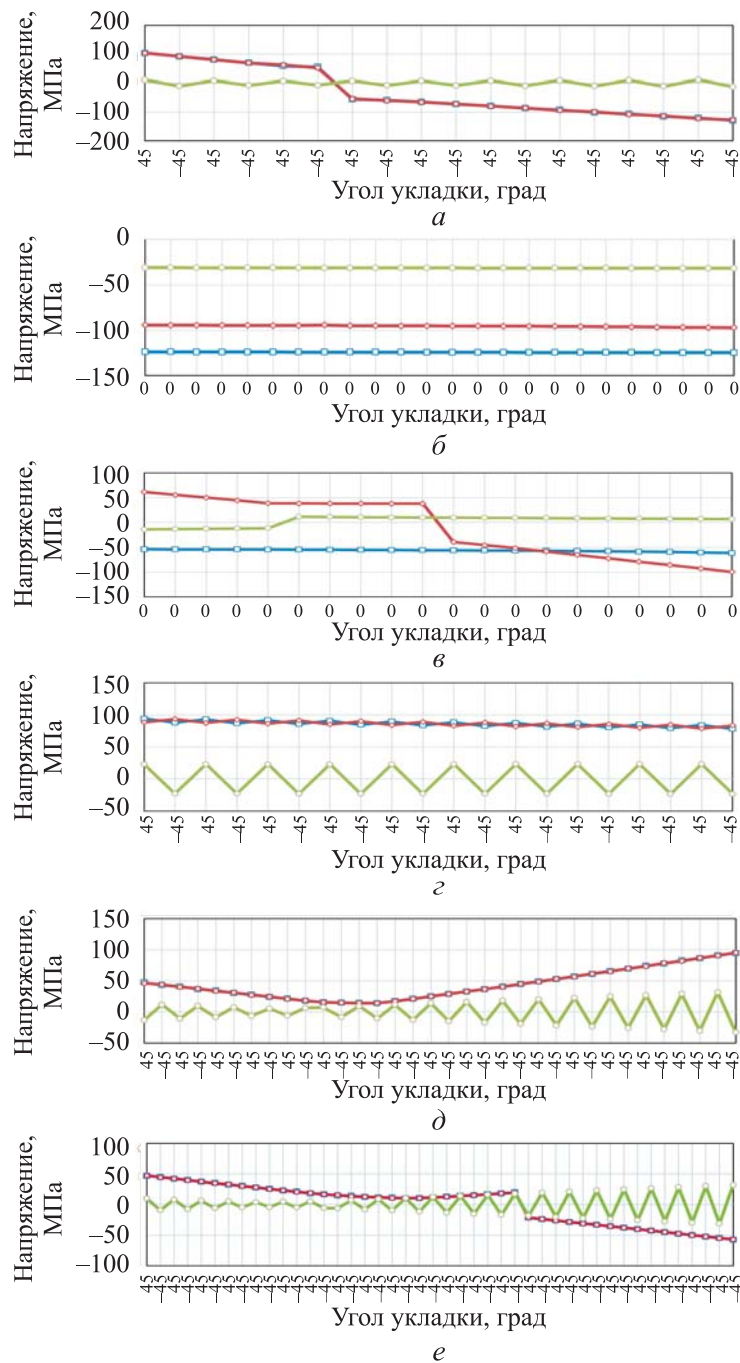
Таблица 4

**Масса шпангоутов и максимальные напряжения, возникающие в них при использовании комбинированных клеємеханических соединений**

Части шпангоутов	Al 7075-T73			Ti-6Al-4V		
	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_c$ , МПа	$\tau_c$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_c$ , МПа	$\tau_c$ , МПа
<i>Первый шпангоут</i>						
Круговая	119,66	-128,86	71,02	119,65	-128,84	71,059
Вертикальная	98,828	-135,68	67,892	98,80	-135,57	67,84
Левое угловое усиление	51,511	-73,606	41,025	51,329	-73,641	40,694
Правое угловое усиление	54,169	-46,045	29,871	54,146	-46,021	30,05
Клеевые слои	9,2873	-9,9922	7,781	9,2844	-9,983	7,7822
<i>Второй шпангоут</i>						
Круговая	75,478	-96,152	61,132	75,455	-96,187	61,077
Вертикальная	125,61	-74,811	62,81	125,35	-75,655	62,673
Угловое усиление	43,269	-82,186	57,15	43,462	-82,168	57,043
Клеевые слои	5,104	-7,6022	4,14	5,107	-7,6108	4,146
<i>Третий шпангоут</i>						
—	116,94	-84,061	58,36	116,94	-84,006	58,36
<i>Четвертый шпангоут</i>						
—	65,219	-80,067	40,34	65,22	-80,677	40,337
Болты 1-го шпангоута	265,18	-264,98	132,60	392,51	-391,71	196,28
Болты 2-го шпангоута	193,78	-187,98	96,892	277,49	-269,26	138,74

Распределения главных напряжений в слоях многослойных композитных частей силовых шпангоутов фюзеляжа в случае применения клеємеханического соединения показаны на рис. 8.

**Оценка прочности слоистых силовых шпангоутов.** Для оценки прочности слоистых композитных шпангоутов из ПКМ рассмотрены две наиболее широко используемые теории разрушения: критерий разрушения по максимальному напряжению и критерий Цая — Хилла для многослойных композитных шпангоутов [19]:



**Рис. 8.** Распределение главных напряжений в слоях композитных частей шпангоутов фюзеляжа при использовании клеємеханического соединения:

$\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  — напряжения в слое УП вдоль (—○—) и поперек (—○—) волокон соответственно, МПа;  
 $\tau_{12}$  — касательное напряжение (—□—) в слое УП, МПа; а и б — круговая и вертикальная части 1-го шпангоута; в и г — то же для 2-го шпангоута; д и е — для 3-го и 4-го шпангоутов соответственно

$$K_{\sigma_{\max}} = \max \left( \frac{\sigma_1^i}{X_1}, \frac{\sigma_2^i}{X_2}, \left| \frac{\tau_{12}^i}{S_{12}} \right| \right) \leq 1, \quad (1)$$

$$K_{\text{ЦХ}} = \left[ \frac{\sigma_1^i}{X_1} \right]^2 - \left[ \frac{\sigma_1^i \sigma_2^i}{(X_1)^2} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_2^i}{X_2} \right]^2 + \left[ \frac{\tau_{12}^i}{S_{12}} \right]^2 \leq 1. \quad (2)$$

Здесь  $X_1 = X_1^+$ , если  $\sigma_1 > 0$ ;  $X_1 = X_1^-$ , если  $\sigma_1 < 0$ ;  $X_2 = X_2^+$ , если  $\sigma_2 > 0$ ;  $X_2 = X_2^-$ , если  $\sigma_2 < 0$ ;  $K_{\sigma_{\max}}$  — коэффициент критерия максимального напряжения;  $K_{\text{ЦХ}}$  — коэффициент критерия Цая — Хилла;  $X_1^+$ ,  $X_1^-$  — предел прочности слоистого материала при растяжении и сжатии в направлении-1, МПа;  $X_2^+$ ,  $X_2^-$  — предел прочности слоистого материала при растяжении и сжатии в направлении-2, МПа;  $S_{12}$  — предел прочности материала при сдвиге, МПа;  $\sigma_1^i, \sigma_2^i$  — напряжения в  $i$ -м слое УП вдоль и поперек волокон соответственно, МПа;  $\tau_{12}^i$  — касательное напряжение в  $i$ -м слое УП, МПа.

Коэффициент запаса прочности в силовых шпангоутах по критерию максимального напряжения и Цая — Хилла можно вычислять по следующим соотношениям [19]:

$$\eta_{\sigma_{\max}} = \frac{1}{K_{\sigma_{\max}}}; \quad (3)$$

$$\eta_{\text{ЦХ}} = \frac{1}{\sqrt{K_{\text{ЦХ}}}}, \quad (4)$$

где  $\eta_{\sigma_{\max}}$  и  $\eta_{\text{ЦХ}}$  — коэффициент запаса прочности по критерию максимального напряжения и Цая — Хилла соответственно.

Распределение значения критерия разрушения Цая — Хилла в композитных силовых шпангоутах при использовании клеевого соединения приведено на рис. 9.

Для сравнения в табл. 5 представлены значения для двух критериев разрушения и коэффициента запаса композитных шпангоутов хвостовой части фюзеляжа при использовании клеевого соединения. Анализ значений минимальных коэффициентов запаса шпангоутов показывает, что в клеевых слоях минимальное значение составило 1,523, а это больше требуемого значения 1,5.

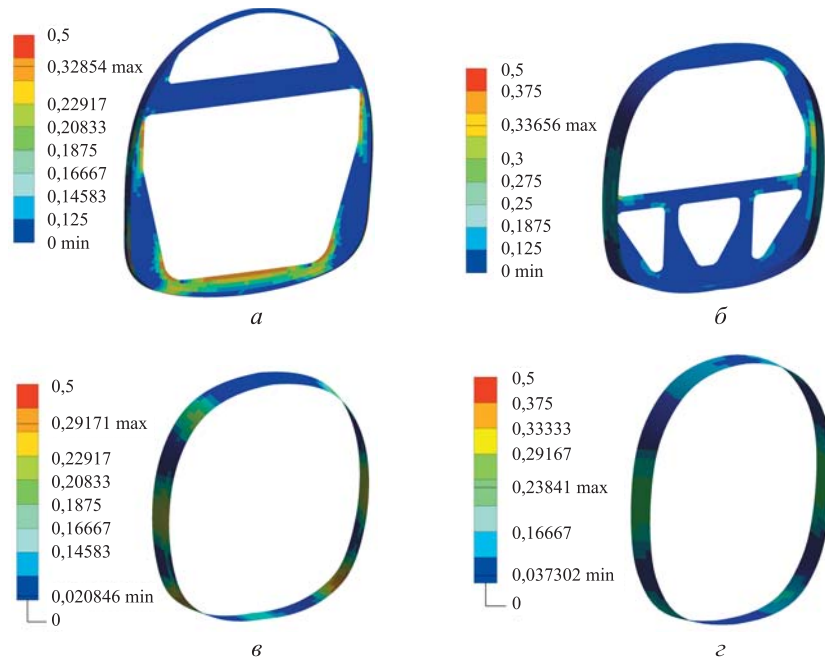


Рис. 9. Распределение значения критерия Цая — Хилла в 1-м (а), 2-м (б), 3-м (в) и 4-м (г) силовых шпангоутах при использовании клеевого соединения

Таблица 5

**Максимальные критерия разрушения и минимальные коэффициенты запаса частей силовых шпангоутов при использовании клеевого соединения**

Часть шпангоута	$K_{\sigma \max}$	$\eta_{\sigma \max}$	$K_{ЦХ}$	$\eta_{ЦХ}$
Круговая часть 1-го шпангоута	0,247	4,049	0,291	1,854
Вертикальная часть 1-го шпангоута	0,328	3,053	0,329	1,744
Угловые усиления 1-го шпангоута	0,163	6,151	0,249	2,001
Круговая часть 2-го шпангоута	0,194	5,152	0,233	2,074
Вертикальная часть 2-го шпангоута	0,267	3,749	0,304	1,812
Угловое усиление 2-го шпангоута	0,281	3,559	0,337	1,723
3-й шпангоут	0,292	3,429	0,292	1,851
4-й шпангоут	0,238	4,194	0,238	2,048
Клеевые слои	0,657	<b>1,523</b>	—	—

*Примечание:*  $K_{\sigma \max}$  — коэффициент критерия максимального напряжения;  $K_{ЦХ}$  — коэффициент критерий разрушения Цая — Хилла;  $\eta_{\sigma \max}$  и  $\eta_{ЦХ}$  — коэффициент запаса прочности по критерию максимального напряжения и Цая — Хилла соответственно.

Распределение значения критерия разрушения Цая — Хилла в композитных силовых шпангоутах при использовании клеемеханического соединения представлено на рис. 10.

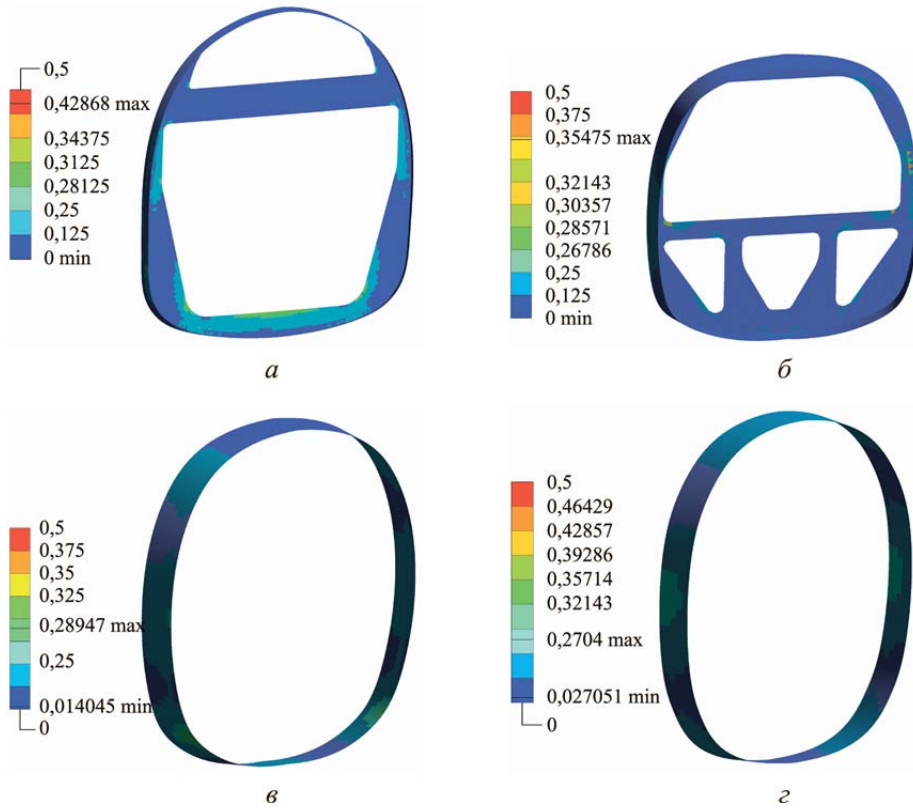


Рис. 10. Распределения значения критерия Цая — Хилла в 1-м (а), 2-м (б), 3-м (в) и 4-м (г) силовых шпангоутах в случае применения клеемеханического соединения

Таблица 6

Максимальные критерии разрушения и минимальные коэффициенты запаса частей силовых шпангоутов при использовании клеемеханического соединения

Часть шпангоута	$K_{\sigma \max}$	$\eta_{\sigma \max}$	$K_{Ц-X}$	$\eta_{Ц-X}$
Круговая часть 1-го шпангоута	0,319	3,127	0,299	1,829
Вертикальная часть 1-го шпангоута	0,311	3,221	0,339	<b>1,718</b>
Угловые усиления 1-го шпангоута	0,482	2,077	0,429	1,527
Круговая часть 2-го шпангоута	0,233	4,285	0,269	1,925
Вертикальная часть 2-го шпангоута	0,289	3,461	0,309	1,797
Угловое усиление 2-го шпангоута	0,268	3,729	0,355	1,679
3-й шпангоут	0,289	3,455	0,289	1,859
4-й шпангоут	0,269	3,705	0,271	1,923
Клеевые слои	0,455	2,2	–	–
Болты из титанового сплава	0,413	2,421	–	–

Минимальные значения коэффициента запаса прочности по критериям максимального напряжения и Цая — Хилла при комбинированном клеємеханическом соединении приведены в табл. 6. Результаты показывают, что минимальное значение коэффициента запаса углового усиления 1-го шпангоута составило 1,718, а это даже больше требуемого значения.

**Заключение.** Проведенное моделирование напряженно-деформированного состояния силовых шпангоутов показало, что максимальные напряжения в силовых шпангоутах при использовании клеємеханического соединения несущественно отличаются от только клеєвого соединения, тогда как масса силового набора в случае применения клеємеханического соединения всего на 0,17 % больше, чем при одном клеєвом соединении. Таким образом, можно сделать вывод, что с точки зрения обеспечения максимальной надежности конструкции следует рекомендовать использование комбинированного соединения, которое обеспечивает работоспособность конструкции в случае нарушения целостности клеєвого соединения, что гарантирует успешное завершение полета.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tooren M., Kasapoglou C., Bersee H. Composite materials, composite structures, composite systems. *The Aeronautical Journal*, 2011, vol. 115 (1174). DOI: 10.107/S0001924000006527
- [2] Zagainov G.I., Lozino-Lozinsky G.E. *Composite materials in aerospace design*. Chapman & Hall, 1996, 460 p.
- [3] Буланов И.М., Воробей В.В. *Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998, 516 с.
- [4] Вашуков Ю.А. *Особенности сборки деталей из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов*. Самара, Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007, 68 с.
- [5] Banea M.D., Silva L.F.M. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Proc. IMechE. Part L: J. Materials: Design and Applications*, 2009, vol. 223. DOI: 10.1243/14644207JMDA219
- [6] Siddique A., Iqbal Z., Nawab Y., Shaker K. A review of joining techniques for thermoplastic composite materials. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2023, vol. 36 (8), pp. 3417–3454. DOI: 10.1177/08927057221096662
- [7] *Diamond DA 62*. URL: <https://www.diamondaircraft.com/en/flight-school-solution/concept/> (дата обращения: 11.01.2024).
- [8] Тун Лин Хтет, Просунцов П.В. Оптимизация формы шпангоутов и углов укладки полимерного композиционного материала силового набора хвостовой части легкого самолета. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 9 (738), с. 97–107. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-9-97-107
- [9] Тун Лин Хтет, Просунцов П.В. Методика проектирования композитного силового набора хвостовой части фюзеляжа. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 2 (755), с. 84–95. DOI: 10.18698/0536-1044-2023-2-84-95



- [10] Tun Lin Htet, Prosuntsov P.V. Comparative analysis of methods for calculating the physico-mechanical characteristics of multi-layered composite materials. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 376, no. 01050. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337601050>
- [11] Noeske M. Introduction to recent advances in quality assessment for adhesive bonding technology. *Adhesive bonding of aircraft composite structures*. Springer, 2021, 364 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92810-4>
- [12] Мартынов Г.В., Монастырева Д.Е., Астафьева Н.С. Клеевое соединение композиционных материалов в условиях ускоренного климатического старения. *Вестник МГСУ*, 2021, т. 16, № 4, с. 429–437. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.429-437
- [13] Biszczanik A., Talaska K., Wilczynski D. Analysis of the adhesive spread and the thickness of the adhesive bonded joint depending on the compressive force applied to bonded materials with different surface structure. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2022, vol. 114 (3). DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2021.103081
- [14] El-Sisi A., Hassanin A., Alsharari F., Galustanian N., Salim H. Failure behavior of composite bolted joints: Review. *Advances in Civil Engineering*, 2022, vol. 3, pp. 1061–1076. <https://doi.org/10.3390/civileng3040060>
- [15] *Glass reinforced plastic (GRP) and Aluminium bolted T-joints*. URL: <https://www.lusas.com/case/composite/tjoints.html> (дата обращения: 09.03.2023).
- [16] Мартынов Г.В., Монастырева Д.Е., Макаров А.И., Морина Е.А., Дауров З.С., Тихонов Р.С. Болтовые соединения композиционных материалов в условиях климатического старения. *Вестник МГСУ*, 2019, т. 14, № 7, с. 852–861. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.852-861
- [17] Semenova I., Polyakov A., Gareev A., Makarov V., Kazakov I., Pesin M. Machinability features of TI-6Al-4V Alloy with ultrafine-grained structure. *Metals*, 2023, vol. 13 (10), no. 1721. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13101721>
- [18] *Bolted connections in ANSYS Workbench: Part 1*. URL: <https://www.endeavos.com/bolted-connections-ansys-workbench-part-1/> (дата обращения: 12.01.2023).
- [19] Гриневиц Д.В., Яковлев Н.О., Славин А.В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор). *Испытания материалов. Труды ВИАМ*, 2019, № 7 (79), с. 92–111. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111

Статья поступила в редакцию 05.11.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Тун Лин Хтет, Просунцов П.В. Выбор способа крепления частей композитных силовых шпангоутов хвостовой части фюзеляжа легкого самолета. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 12. EDN AIZQCC

**Тун Лин Хтет** — аспирант кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: проектирование конструкции летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов. e-mail: [tunlinhtet64509@gmail.com](mailto:tunlinhtet64509@gmail.com)

**Просунцов Павел Викторович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: анализ и идентификация процессов комбинированного теплопереноса в высокопористых материалах. e-mail: [pavel.prosuntsov@mail.ru](mailto:pavel.prosuntsov@mail.ru)

## Selection of the method for joining composite structural elements in the tail fuselage of a light aircraft

© Tun Lin Htet, P.V. Prosuntsov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

*The paper examines various methods for joining components made of polymer composite materials, focusing on adhesive and combined adhesive-mechanical joints. The main focus is on the comparative analysis of these joint types in terms of their effectiveness and manufacturability, as well as the impact on the structural strength and overall weight of the assembly. Aerodynamic and mass-inertial forces influencing the aircraft in various design load cases were considered. Using the ANSYS Workbench, the stress-strain state of the structural elements (ribs) was analyzed. Based on the analysis results, the paper proposes a rational method for joining composite structural components, which ensures weight reduction of the structure while maintaining sufficient strength and reliability of the assembled elements. The strength of structural elements was evaluated taking into consideration their safety factors according to the failure criteria for composite materials.*

**Keywords:** polymer composite materials, carbon fiber, adhesive joint, adhesive-mechanical joint, ribs, structural elements, fuselage

### REFERENCES

- [1] Tooren M., Kasapoglou C., Bersee H. Composite materials, composite structures, composite systems. *The Aeronautical Journal*, 2011, vol. 115 (1174). <https://doi.org/10.107/S0001924000006527>
- [2] Zagainov G.I., Lozino-Lozinsky G.E. *Composite materials in aerospace design*. Chapman & Hall, 1996, 460 p.
- [3] Bulanov I.M., Vorobey V.V. Tekhnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstruktsiy iz kompozitsionnykh materialov [Technology of rocket and aerospace structures made of the composite materials]. Moscow, BMSTU Publ., 1998, 516 p.
- [4] Vashukov Yu.A. Osobennosti sborki detaley iz kompozitsionnykh materialov v konstruktsiyakh letatel'nykh apparatov [Features of the composite material parts assembly in the aircraft structures]. Samara, Samara State Aerospace University Publ., 2007, 68 p.
- [5] Banea M.D., Silva L.F.M. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Proc. IMechE. Part L: J. Materials: Design and Applications*, 2009, vol. 223. <https://doi.org/10.1243/14644207JMDA219>
- [6] Siddique A., Iqbal Z., Nawab Y., Shaker K. A review of joining techniques for thermoplastic composite materials. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2023, vol. 36 (8), pp. 3417–3454. <https://doi.org/10.1177/08927057221096662>
- [7] *Diamond DA 62*. Available at: <https://www.diamondaircraft.com/en/flight-school-solution/concept/> (accessed January 11, 2024).
- [8] Tun Lin Htet, Prosuntsov P.V. Optimizatsiya formy shpangoutov i uglov ukladki polimernogo kompozitsionnogo materiala silovogo nabora khvostovoy chasti legkogo samoleta [Design optimization of shape and layup sequence of polymer composite load bearing elements of light aircraft]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 2 (755). pp. 97–107. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-9-97-107>

- [9] Tun Lin Htet, Prosuntsov P.V. Metodika proyektirovaniya kompozitnogo silovogo nabora khvostovoy chasti fyuzelyazha [Method of designing the composite load-bearing elements of the fuselage tail section]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 2 (755), pp. 84–95. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-2-84-95>
- [10] Tun Lin Htet, Prosuntsov P.V. Comparative analysis of methods for calculating the physico-mechanical characteristics of multi-layered composite materials. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 376, no. 01050. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337601050>
- [11] Noeske M. Introduction to recent advances in quality assessment for adhesive bonding technology. *Adhesive bonding of aircraft composite structures*. Springer, 2021, 364 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92810-4>
- [12] Martynov G.B., Monastyreva D.E., Astafieva N.S. Kleyevoye soedinenie kompozitsionnykh materialov v usloviyakh uskorenogo klimaticheskogo stareniya [Adhesive compound of composite materials in conditions of accelerated climatic aging]. *Vestnik MGSU*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 429–437. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.4.429-437>
- [13] Biszczanik A., Talaska K., Wilczynski D. Analysis of the adhesive spread and the thickness of the adhesive bonded joint depending on the compressive force applied to bonded materials with different surface structure. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2022, vol. 114 (3). <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.103081>
- [14] El-Sisi A., Hassanin A., Alsharari F., Galustanian N., Salim H. Failure behavior of composite bolted joints: Review. *Advances in Civil Engineering*, 2022, vol. 3, pp. 1061–1076. <https://doi.org/10.3390/civileng3040060>
- [15] *Glass reinforced plastic (GRP) and Aluminium bolted T-joints*. Available at: <https://www.lusas.com/case/composite/tjoints.html> (accessed March 9, 2023).
- [16] Martynov G.V., Monastyreva D.E., Makarov A.I., Morina E.A., Durov Z.S., Tikhohov R.S. Boltovyye soyedineniya kompozitsionnykh materialov v usloviyakh klimaticheskogo stareniya [Bolt attachments of composite materials under conditions of climate ageing]. *Vestnik MGSU*, 2019, vol. 14, no. 7, pp. 852–861. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.7.852-861>
- [17] Semenova I., Polyakov A., Gareev A., Makarov V., Kazakov I., Pesin M. Machinability features of TI-6Al-4V alloy with ultrafine-grained structure. *Metals*, 2023, vol. 13 (10), no. 1721. <https://doi.org/10.3390/met13101721>
- [18] *Bolted connections in ANSYS Workbench: Part 1*. Available at: <https://www.endeavos.com/bolted-connections-ansys-workbench-part-1/> (accessed January 12, 2023).
- [19] Grinevich D.V., Yakovlev N.O., Slavin A.V. Kriterii razrusheniya polimernykh kompozitsionnykh materialov (obzor). [The criteria of the failure of polymer matrix composites (review)]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), pp. 92–111. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111>

**Tun Lin Htet**, Postgraduate, Department of Space-Rocket Composite Designs, Bauman Moscow State Technical University. Scientific interest: design of aircraft structures made of polymer composite materials. e-mail: [tunlinhtet64509@gmail.com](mailto:tunlinhtet64509@gmail.com)

**Prosuntsov P.V.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University. Scientific interest: design of aerospace structures made of composite materials that operate under conditions of intense mechanical and thermal loading. e-mail: [pavel.prosuntsov@mail.ru](mailto:pavel.prosuntsov@mail.ru)