

УДК 629.12

А.В. Клопота, канд. техн. наук,
М.А. Шевцова, канд. техн. наук,
К.П. Дронова

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СТЫКОВ ОБШИВКИ С ПОДКРЕПЛЯЮЩИМ НАБОРОМ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Одной из проблем формирования обшивки с подкрепляющим силовым набором при изготовлении каркасных или интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов является недостаточное уплотнение выложенного пакета, возникновение воздушных включений и утяжки слоёв в углах оправок (рис.1).



Рисунок 1 - Трубчатая конструкция с воздушными включениями в местах стыков

Данные дефекты снижают несущую способность и эксплуатационную надежность конструкции, приводят к отслоению обшивки от наполнителя и влияют на внешнюю поверхность конструкции (рис. 2).



Рисунок - 2 Дефекты наружной поверхности в зоне расположения стыков обшивки с подкрепляющим набором

Решение этой проблемы возможно посредством следующих операций:

- выкладка элементов подкрепляющего набора;

- введение под цулагу в зону стыка изолированных эластичных элементов;
- вакуум-автоклавное формование набора;
- промежуточный контроль проблемных мест;
- устранение дефектов и шпаклевка неровностей поверхности;
- приформовка или приклейка наружных обшивок.

Такое технологическое решение, хотя и способствует улучшению качества выложенного пакета композиционного материала, все же приводит к повышению трудоемкости изготовления конструкции за счет увеличения объема доводочных работ и завышению веса конструкции, связанного с введением шпаклевочных составов [1].

Из практики производства конструкций из полимерных композиционных материалов известно применение вспенивающихся клеевых композиций типа ВКВ-3 и дополнительных волокнистых наполнителей в местах стыков элементов. Однако количество наполнителя, необходимое для качественного формирования стыка, а так же и эффективность этих конструктивно-технологических решений до сих пор не исследовали.

Поэтому настоящая работа посвящена исследованию возможности улучшения качества формируемых стыков, путем дополнительного введения углеродного жгутового наполнителя или вспенивающихся клеевых композиций.

Для сравнения и определения эффективности конструктивно-технологических решений заполнения стыка изготавливались шесть типов образцов:

- 1) без введения в зону стыка дополнительного материала (традиционное конструктивно-технологическое решение);
- 2) введение в место стыка вспенивающейся клеевой композиции ВКВ-3;
- 3) введение в место стыка двух углежгутов марки УКН-П 5000 [2];
- 4) введение в место стыка трех углежгутов марки УКН-П 5000;
- 5) введение в место стыка четырех углежгутов УКН-П 5000;
- 6) введение в место стыка шести углежгутов УКН-П 5000.

Параметры стыка будут зависеть от параметров формообразующей оправки (рис. 3), поэтому площадь поперечного сечения стыка принята по рис. 4 с заданным радиусом скругления трубок. Зависимость площади стыка от радиуса скругления резиновых оправок приведена на рис. 5. Из представленного графика видно, что увеличение площади стыка происходит при незначительном изменении радиуса оправки, что, в свою очередь, будет требовать резкого увеличения вводимого количества жгутов УКН-П 5000. Поэтому вопрос оптимального заполнения мест стыка очень важен при расчете необходимого количества материала и должен быть оправдан, помимо всего прочего, и экономической эффективностью.

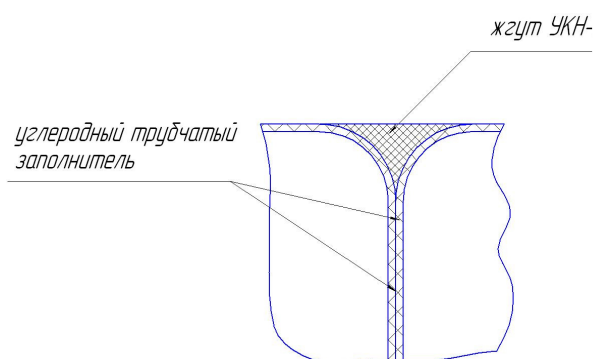


Рисунок - 3 Схематическое изображение стыка

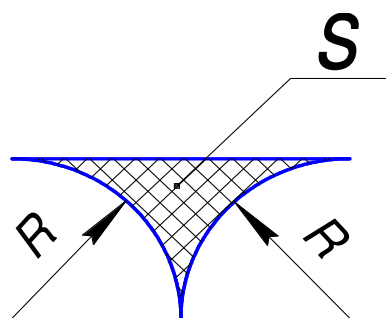


Рисунок - 4 Модель стыка элементов интегральной конструкции

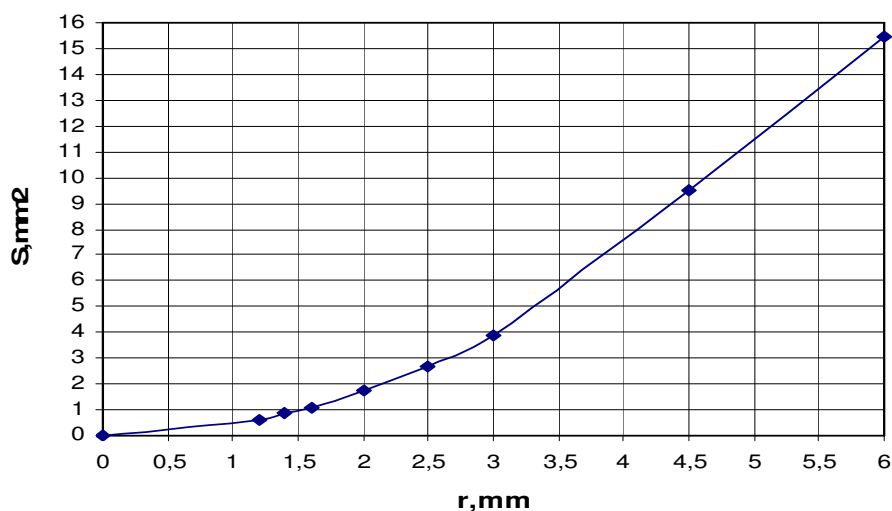


Рисунок - 5 Зависимость площади заполняемого стыка от радиуса скругления оправок

В результате замеров радиуса скругления поставляемых резиновых оправок для изготовления трубчатого наполнителя было выявлено, что величина радиуса скругления варьируется от 1,2 до 1,6 мм. Для чистоты эксперимента было принято решение зашкурить торцы оправок, обеспечив одинаковый радиус скругления по всей длине, равный 1,6 мм.

При этом применялись резиновые оправки сечением 15x15 мм.

Для отработки режимов получения бездефектных стыков использовались материалы:

- углежгут УКН-П 5000;
- связующее ЭДТ-69Н;
- вспенивающаяся клеевая композиция ВКВ-3;
- углелента ЭЛУР-0,08П.

Трубчатый наполнитель изготавливали намоткой на резиновые оправки двух слоев углеленты под углом $\pm 45^\circ$. Наружные обшивки изготавливали выкладкой двух слоев углеленты под углом 0° и 90° . Формование панели для образцов выполняли по режиму связующего ЭДТ-69Н.

После формования панели на нее была перенесена разметка образцов (рис. 6).

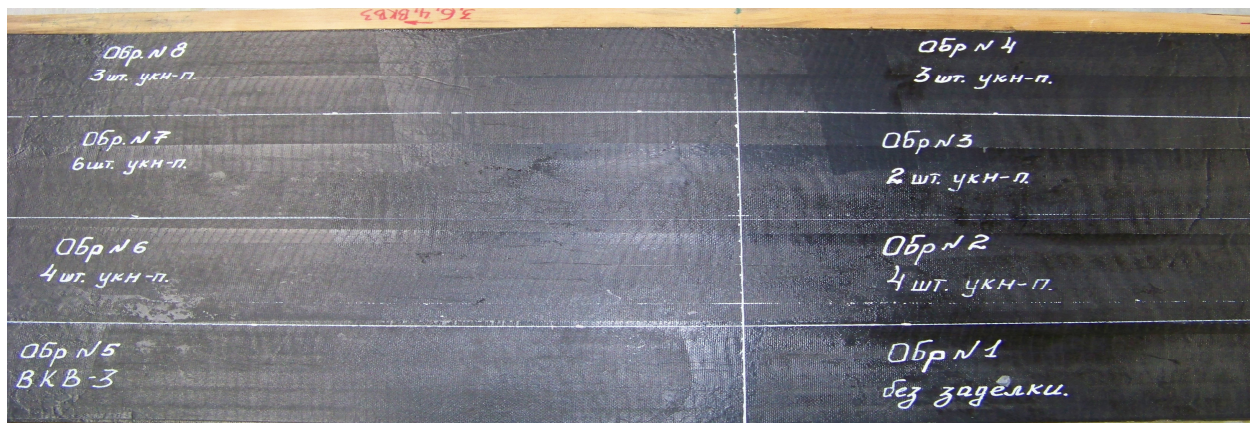


Рисунок 6 - Отформованная панель

С целью определения качества заполнения мест стыков, из каждого образца изготовились шлифы, которые исследовались на наличие пор, отслоение и других дефектов под микроскопом при 12-кратном увеличении. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Сравнение эффективности образцов с точки зрения прочности производилось посредством испытания их на четырехточечный изгиб (рис 7). Результаты испытаний представлены в табл. 2.

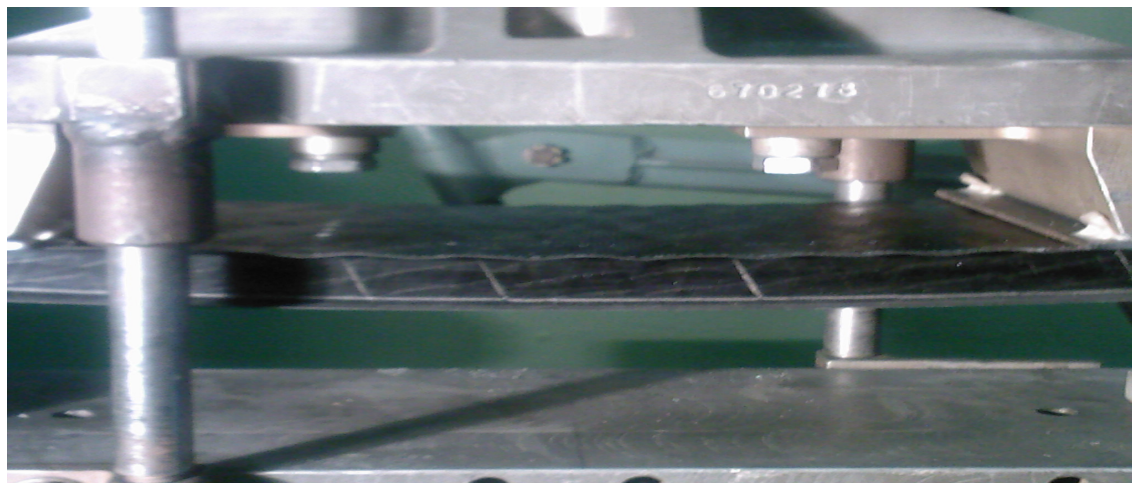


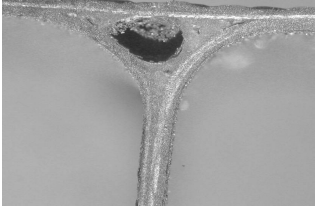
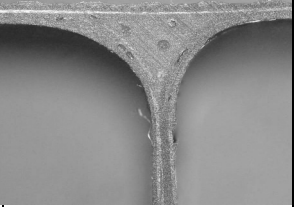

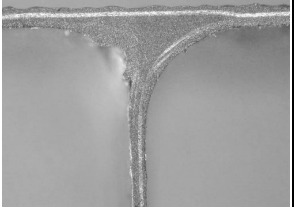
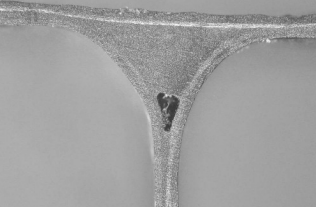
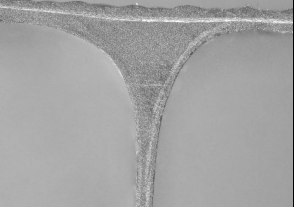
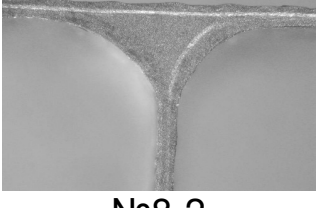
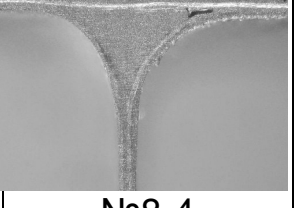
Рисунок 7 - Испытания образцов на четырехточечный изгиб

Напряжения на изгиб вычисляли по формуле, приведенной в [3].

$$\sigma_{изг} = \frac{3 \cdot P_{max} \cdot d}{b \cdot H^2} \quad (1)$$

где b - ширина образца; H - высота образца, d – расстояние между крайними опорами, P_{max} – разрушающая нагрузка образца при эксперименте. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 1 - Образцы из углепластика со стыками, заполненными различными заполнителями

№ образца	Фотографии шлифов	Номер исследуемого стыка									
		1	2	3	4	5	6				
1	Без заполнения	 № 1-2	 № 1-4	Размер	пор, мм	Пора 0,4x0,6	Пора 1,5x0,8	Пора Ø0,15	Пора Ø0,2	3 поры Ø0,2	-
					галтели h/a, мм	$\frac{1,3}{2,5}$	$\frac{1,5}{3}$	$\frac{1,7}{3}$	$\frac{1,7}{3,5}$	$\frac{1,7}{3,5}$	
3	2 углежгута	 № 3-2	 №3-5	Размер	пор, мм	Пор нет		Отслоение	Пор нет		-
					галтели h/a, мм	$\frac{1,3}{3}$	$\frac{0,8}{3}$	$\frac{1,2}{2,3}$	$\frac{1,5}{3}$	$\frac{0,9}{2}$	
4	3 углежгута	 №4-3	 №4-4	Размер	пор, мм	Пор нет		Пора 0,4x0,6	Пор нет		-
					галтели h/a, мм	$\frac{1,3}{3}$	$\frac{1,6}{3}$	$\frac{2,0}{3,5}$	$\frac{2,2}{3,5}$	$\frac{1,5}{3}$	
8	3 углежгута	 №8-2	 №8-4	Размер	пор, мм	Пор нет			Пора 0,2x0,5	Пор нет	-
					галтели h/a, мм	$\frac{2}{5}$	$\frac{1,5}{3}$	$\frac{2,0}{3,5}$	$\frac{1,8}{3,5}$	$\frac{1,8}{3}$	

Продолжение таблицы 1

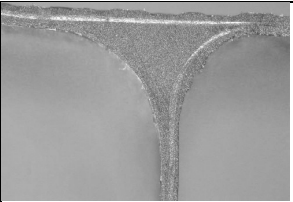
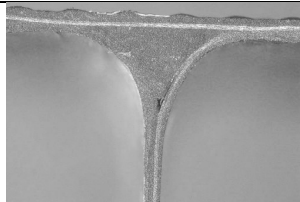
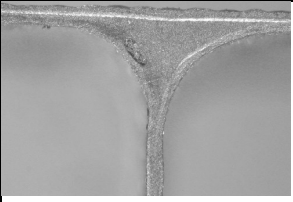
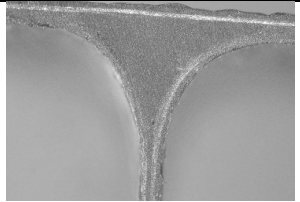
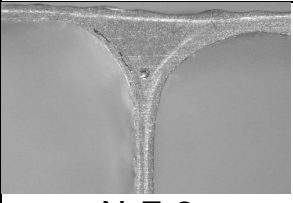
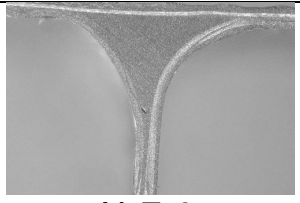
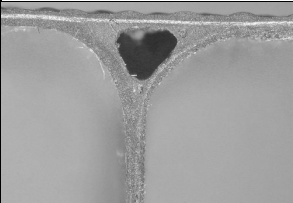
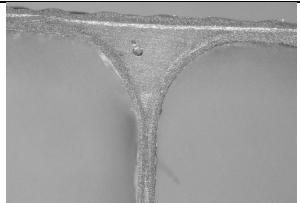
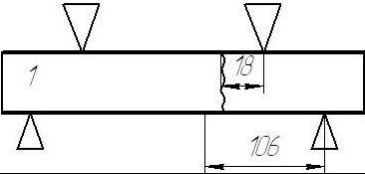
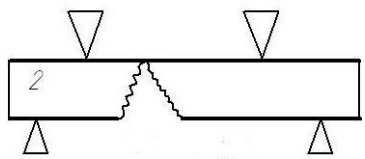
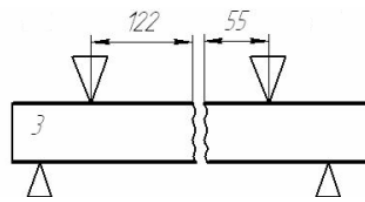
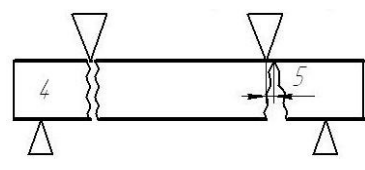
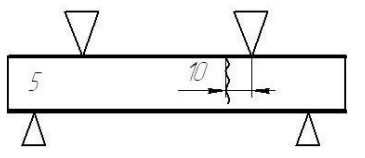
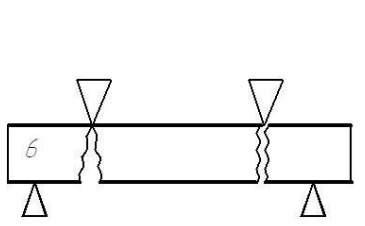
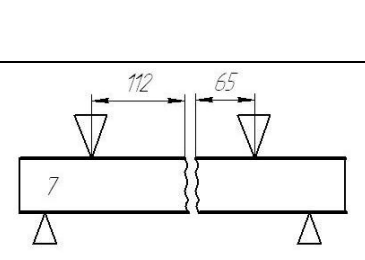
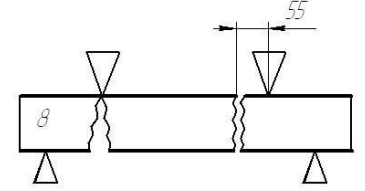
2	4 углежгута			Размер	пор, мм	Поры отсутствуют					Отслоение
		№2-2	№2-6		галтели h/a, мм	$\frac{2}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{1,6}{4}$	$\frac{1,9}{3,5}$	$\frac{1,6}{4,4}$	$\frac{1,5}{3,2}$
6	4 углежгута				пор, мм	Поры отсутствуют				Пора 0,7x0,4	-
		№6-5	№6-6		галтели h/a, мм	$\frac{1,7}{4,5}$	$\frac{1,7}{3,5}$	$\frac{1,5}{3,2}$	$\frac{1,9}{3,6}$	$\frac{1,8}{4,2}$	$\frac{2}{4,7}$
7	6 углежгута				пор, мм	-	Пора 1,1x0,5	Отслоение	-	-	-
		№7-3	№7-6		галтели h/a, мм	$\frac{1,5}{4}$	$\frac{1,6}{4}$	$\frac{1,7}{3}$	$\frac{1,4}{3}$	$\frac{1,7}{4,5}$	$\frac{2}{4}$
5	ВКВ-3				пор, мм	Пора 0,5x0,6	Пора 1,1x1,3	Пора Ø0,2	Пора Ø0,1	Поры 0,6x0,9	-
		№5-2	№5-3		галтели h/a, мм	$\frac{1,8}{4,2}$	$\frac{1,7}{4}$	$\frac{1,6}{3}$	$\frac{1,9}{3,5}$	$\frac{1,5}{3,8}$	

Таблица 2 - Результаты испытаний образцов на изгиб

№ образца	Заполнитель	Нагрузка Р, кг	δ , мм	$\sigma_{разр}$, кгс/мм ²	Характер разрушения	Описание вида и характера разрушения
1	нет	200	6,4	2,87		На верхней обшивке образовалась трещина
2	Жгут УКН-П 5000 4шт	475	7,8	6,12		Разрушилась нижняя обшивка и заполнитель
3	Жгут УКН-П 5000 2шт	340	7,2	4,39		Разрушение произошло между точками приложения нагрузки
4	Жгут УКН-П 5000 3шт	374	8	5,30		Разрушения в зонах приложения нагрузки
5	ВКВ-3	200	7	2,70		На верхней обшивке образовалась трещина
6	Жгут УКН-П 5000 4шт	525	9,8	6,65		При Р=380 кг на верхней обшивке пошла волна. Разрушение в точках приложения нагрузки
7	Жгут УКН-П 5000 6шт	488	9	6,26		При Р=287 кг на верхней обшивки пошла волна
8	Жгут УКН-П 5000 3шт	359	7,8	4,97		Разрушение произошло в точках приложения нагрузки

Как показывают результаты испытаний, введение вспенивающейся клеевой композиции ВКВ-3 не влияет на прочность самой панели, прогиб панели изменяется незначительно.

Образцы, заполненные углежгутами, дали высокие показатели изгибной прочности. Это говорит о том, что введение углеродных жгутов марки УКН-П 5000, имеющих высокий модуль упругости и предел прочности, привело к увеличению прочности и жесткости конструкции в целом. Следует отметить также, что с увеличением количества углежгутов увеличивается и прочность самой конструкции. Так, образец с двумя углежгутами обладает разрушающей нагрузкой равной $4,39 \text{ кгс/мм}^2$, в то время как образец, заполненный четырьмя углежгутами имеет разрушающую нагрузку $5,25 \text{ кгс/мм}^2$. При этом введение шести углежгутов не дало явно выраженного увеличения прочности, что свидетельствует о существовании оптимальных величин количества вводимых углежгутов.

Исходя, из всего изложенного выше, можно сделать вывод, что введение углежгутов способствует не только устранению дефектов в местах стыка трубчатого заполнителя, но и повышает прочность самой конструкции. Влияние введения углежгутов в зону стыка может быть учтено с использованием теории редуцирования. Расчетная схема панели приведена на рис. 8.

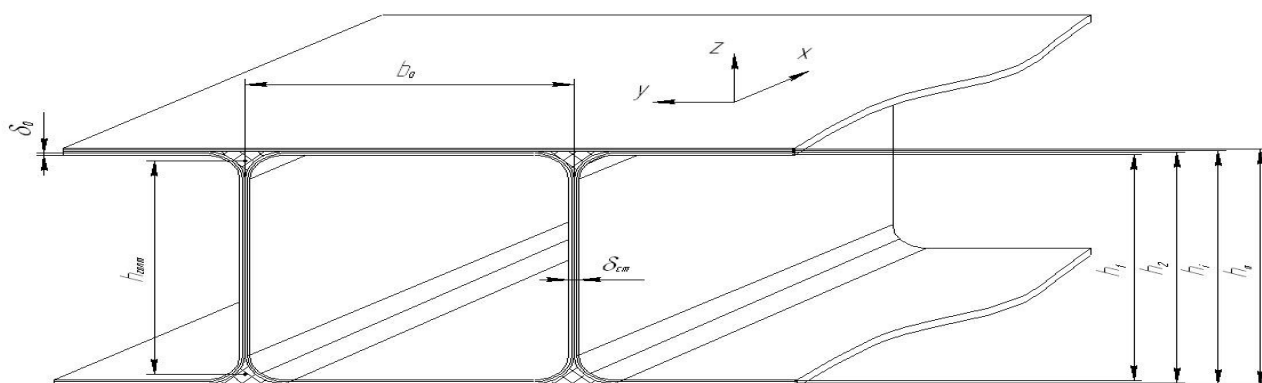


Рисунок 8 - Расчетная схема трубчатой панели с наполненными стыками

При расчете следует учитывать, что введение жгутов приводит к изменению в месте стыка объемного содержания армирующего наполнителя в КМ и, как следствие, прочностных и упругих характеристик композиционного материала в этой области конструкции. Отказ от учета изменения упругих характеристик композиционного материала от величины содержания в нем армирующего наполнителя (в нашем случае от количества углежгутов в стыке) может привести к большим, необоснованным погрешностям. Расчет упругих характеристик материала стыка, обшивки и стенки может быть выполнен, например, по формулам, приведенным в работе [4].

Разрушающее значение изгибающего момента и предельной разрушающей нагрузки, которую может выдержать конструкция с учетом то-

го, что разрушаться первой будет нижняя обшивка при растяжении, можно определить по формуле

$$M_{изг} = \frac{[\sigma_{разр}] \cdot I}{y}, \quad (2)$$

где $[\sigma_{разр}]$ - предел прочности композиционного материала, определенный по результатам испытания на растяжение образцов входного контроля; y - половина толщины конструкции; I - приведенный момент инерции сечения с учетом площади заполненного стыка.

Выводы

1. Введение вспенивающейся композиции ВКВ-3 не гарантирует устранение дефектов и не увеличивает прочность соединения.
2. Введение углежгутов в зону стыков заполнителя с обшивкой способствует процессу устранения дефектов.
3. Прочность конструкции с увеличением количества вводимых углежгутов существенно возрастает. Так введение двух жгутов для рассматриваемой конструкции приводит к увеличению прочности на 70%, а четырех углежгутов - на 162,5%, т. е. введение жгутов в область стыка может служить средством повышения прочности конструкции.
4. Оптимальное количество жгутов для стыков, образованных оправками с радиусами 1,6 мм, равно четырем.
5. Введение углежгутов значительно уменьшает трудоемкость изготовления конструкции за счет уменьшения объема доводочных работ.

Список используемых источников

1. Технология виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів/ С.А. Бичков, О.В. Гайдачук, В.Е. Гайдачук, В.Д. та ін. – К.: ІС-ДО, 1995. – 374 с.
2. ГОСТ 2806-88. Лента углеродная конструкционная. Технические условия. – М.: Из-во стандартов, 1991. - 6 с.
3. ГОСТ 25.604-82 «Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах». М.: Из-во стандартов, 1983. - 11 с.
4. Карпов Я.С. Механика композиционных материалов / Я.С. Карпов, П.П. Лепихин, И.М.Тараненко.– Х.: Нац. аерокосм. ун-т «ХАИ», 2004. – 104 с.

Поступила в редакцию 13.05.09.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. А. Бычков,
АНТК «Антонов», г. Киев*