

Соединения высоконагруженных деталей из композиционных материалов. Сообщение 3. Экспериментальное исследование прочности соединения с трансверсальными крепежными микроэлементами

Я. С. Карпов

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт”, Харьков, Украина

Разработана система комплексного экспериментального обеспечения расчета на прочность и проектирования, которая включает методики проведения экспериментов, конструкции образцов и испытательных устройств. Для соединений с крепежными микроэлементами поперечной связи приведены результаты экспериментального определения коэффициентов податливости; степени снижения прочности углепластиков различных структур в зоне внедрения цилиндрических (диаметр 0,8; 1,0; 1,5 и 2,0 мм) и пирамидальных (фрезерованных) штифтов; анизотропии прочности угле-, стекло- и органического пластика на смятие в зависимости от структуры композиционного материала, направления нагружения, размеров крепежных элементов и способа их установки (внедрение в пакет слоев препрега и совместное формование или установление в просверленные отверстия после полимеризации композиционного материала).

Ключевые слова: образец, испытания, устройство, прочность на смятие, коэффициент снижения прочности, коэффициент податливости, крепежный элемент.

Введение. Из предложенных ранее [1] новых конструктивно-технологических решений (КТР) наибольшие перспективы имеет соединение с трансверсальными крепежными микроэлементами, заформованными в композиционный материал (КМ) при изготовлении деталей. Для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) и оценки несущей способности соединений необходимо располагать рядом специфических физико-механических характеристик, наиболее важные из которых:

коэффициент снижения прочности КМ в зоне заформовки малоразмерных штифтов;

коэффициент податливости связей (клеевые, штифтовые, комбинированные);

прочность КМ на смятие как заформованными микроэлементами, так и установленными в просверленные отверстия после полимеризации изделия.

В окрестности внедряемого в препрег крепежного штифта после формования детали образуется КМ с переменной анизотропией упругих и прочностных свойств. Поэтому использовать в расчетах на прочность классический коэффициент концентрации напряжений невозможно из-за трудностей аналитического определения, а также необходимости его новой трактовки. Исходя из этого предложено ввести понятие коэффициента снижения прочности КМ в месте заформовки крепежных микроэлементов, который может быть определен как отношение напряжений разрушения сечения к пределу прочности регулярного КМ.

В [2] выведены формулы для определения коэффициента податливости связей, необходимых для расчета НДС соединения. Применение известных зависимостей для болтов и заклепок, разработанных расчетчиками КБ ЦАГИ, Boeing, Douglas и др., в данном случае невозможно из-за несоответствия исходных предпосылок для их вывода. Это служит обоснованием для экспериментальной проверки формул, приведенных в [2].

Прочность КМ на смятие является очень сложной и противоречивой характеристикой. Единое мнение о способе ее экспериментального определения отсутствует. Известно, что прочность на смятие зависит от структуры КМ, диаметра крепежного элемента, технологии образования отверстия, характера контакта штифта с КМ и многих других факторов. Формирование достоверной базы данных только начинается. Эти специфические свойства КМ и элементов соединения были достаточно подробно исследованы в лаборатории КМ Харьковского авиационного института.

В сообщениях [1, 2] описаны методика расчета напряженно-деформированного состояния КМ и экспериментальное обеспечение их расчета на прочность.

Коэффициент снижения прочности КМ. Экспериментально анализировали два способа установления крепежных элементов: внедрение в пакет слоев препрега и совместная полимеризация и традиционное установление в просверленные отверстия после изготовления образцов (для диаметра 0,8 мм сверление отверстий обычным инструментом оказалось невозможным).

Коэффициент снижения прочности КМ исследовали на стандартных образцах шириной 20 мм из углепластика со структурой $[0^{\circ}_4, \pm 45^{\circ}, 0^{\circ}_6, \mp 45^{\circ}, 0^{\circ}_4]$ при различных схемах расположения крепежных элементов (рис. 1). Из рис. 1 видно, что коэффициент снижения прочности:

слабо зависит от схемы расположения штифтов;

диаметр крепежного элемента существенно влияет на исследуемую величину;

предложенный способ установления крепежа с сохранением целостности волокон по сравнению со сверлением отверстий обеспечивает значительно меньшее снижение прочности.

Внедрение в пакет слоев препрега пирамидальных (фрезерованных) крепежных элементов по сравнению с цилиндрическими приводит к большему снижению прочности КМ указанной выше структуры, что, вероятно, связано с наличием острых ребер (рис. 2).

Коэффициент податливости связей. Поскольку по типовой методике определения коэффициентов податливости болтов (заклепок) нельзя измерить взаимное смещение деталей, соединенных заформованными крепежными микроэлементами, были разработаны специфические образцы, устройство и методика проведения экспериментов (рис. 3).

Коэффициент податливости определяли как отношение взаимного смещения соединенных деталей к нагрузке на линейном участке диаграммы $\Delta - P$ (рис. 3,б). С целью управления площадью склеивания деталей при заформовке устанавливали разделительный слой из фторопластовой пленки с вырезанным отверстием необходимой формы и размеров (рис. 3,з). В

зависимости от типа проектируемого соединения методика позволяла испытывать одно- и двухсторонние образцы (рис. 3,а,в).

Экспериментальные исследования проводили на образцах соединения с пирамидальными фрезерованными крепежными элементами высотой 3 мм из материала Д16АТ, заформованными в углепластик. Диаграммы $\Delta - P$ имели линейный характер вплоть до среза штифтов у основания. На рис. 4 представлены экспериментальные и расчетные по формуле (35) [2] значения коэффициента податливости. Видно, что аналитические формулы удовлетворительно описывают данные эксперимента (погрешность составляет до 14%).

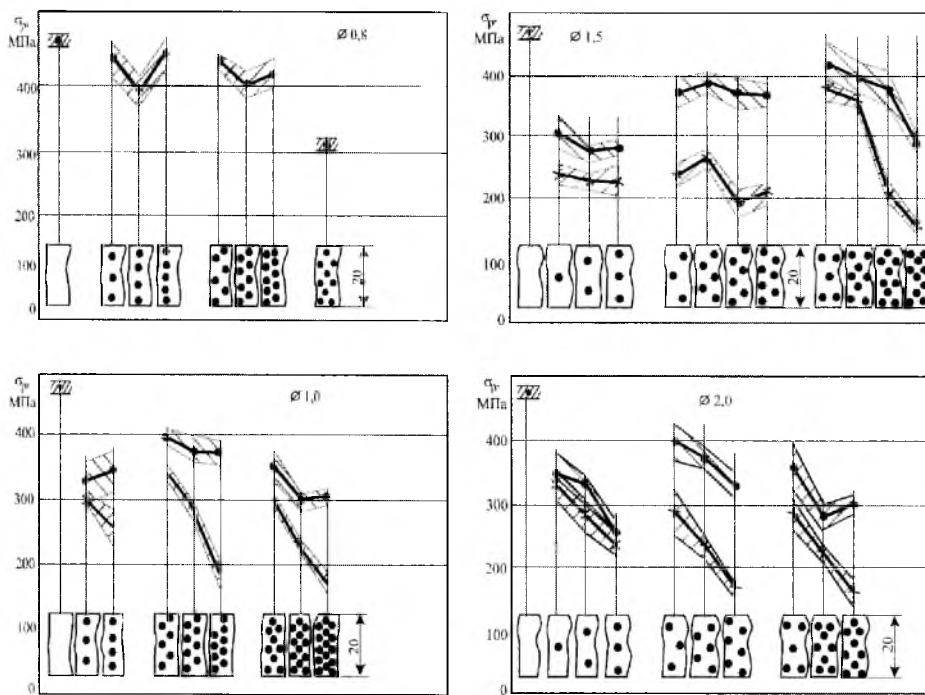


Рис. 1. Экспериментальные значения коэффициента снижения прочности КМ: ● – внедрение; × – сверление.

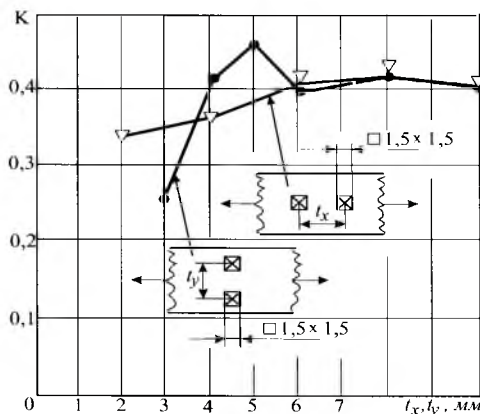


Рис. 2. Экспериментальные значения коэффициента снижения прочности КМ при внедрении пирамидальных крепежных элементов.

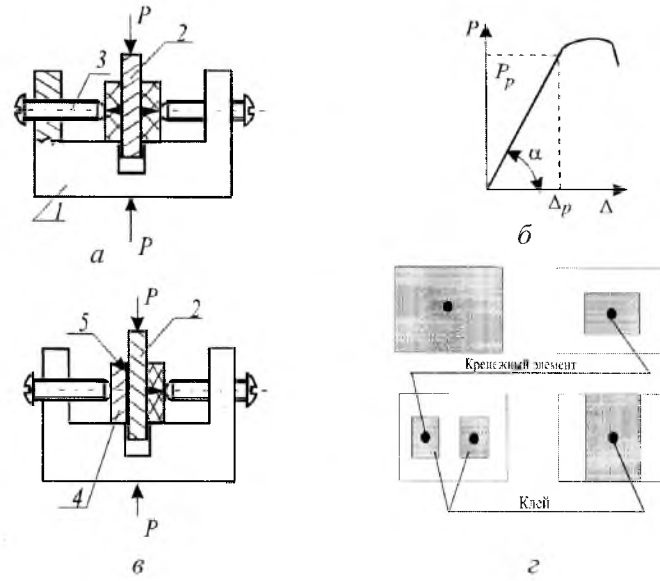


Рис. 3. Образцы и устройство для экспериментального определения коэффициентов податливости крепежных элементов: 1 – устройство; 2 – образец; 3 – фиксирующие винты; 4 – имитатор; 5 – разделительный (антифрикционный) слой.

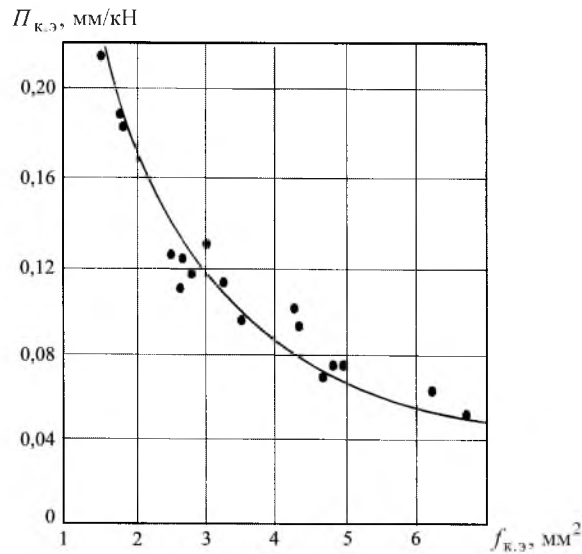


Рис. 4. Экспериментальная (точки) и расчетная по формуле (35) [2] (линия) зависимости коэффициента податливости от площади основания крепежных элементов.

Результаты для чисто клевого соединения тех же элементов свидетельствуют о том, что экспериментальная податливость адгезионного соединения хорошо описывается формулами [2], полученными на основе гипотезы Фолькерсена [3]. Кроме того, структура КМ детали (всего было испытано четыре структуры) практически не влияет на коэффициент податливости. Это, вероятно, связано со слабой зависимостью модуля межслойного сдвига от структуры.

Прочность КМ на смятие. Многие авторы отмечали [4, 5], что прочность КМ на смятие является весьма условной характеристикой материала. В основе ее определения лежат два фактора:

- овализация отверстия на некоторую величину;
- изменение угла наклона или наличие излома на диаграмме нагрузка–перемещение.

Применительно к крепежным микроэлементам использование первого фактора вызывает большие трудности, особенно для штифтов с некруговой формой поперечного сечения. Поэтому за основу был принят второй фактор, позволяющий надежно и без дополнительных измерений определять прочность КМ на смятие.

Известно, что прочность на смятие КМ зависит от размера крепежного элемента, поэтому при исследовании пирамидальных или цилиндрических заостренных штифтов возникает необходимость определения сути понятия “прочность КМ на смятие”. Анализ многочисленных экспериментальных данных [6, 7], а также сложившиеся традиции проектирования и расчета на прочность подтверждают возможность оперирования прочностью КМ на смятие, под которой подразумевается частное от деления максимального усилия линейного участка диаграммы нагрузка–перемещение на площадь проекции крепежного элемента на плоскость, перпендикулярную линии действия силы.

Для исследуемого способа соединения очевидно, что прочность на смятие зависит от технологии реализации соединения, структуры КМ и плотности установки крепежных элементов, так как эти факторы определяют искривление волокон и их объемное содержание по детали. Учитывая многообразие форм, размеров и расположения крепежных элементов, структуры и свойств КМ, а также разнонаправленность результирующей силы, действующей на штифт по поверхности соединения, были разработаны достаточно универсальные образцы (рис. 5) и испытательное устройство. Образец представляет собой диск диаметра 200...250 мм, в котором в процессе изготовления производится заформовка исследуемых крепежных элементов. Испытания проводятся на универсальных разрывных машинах, снабженных тарированным самопишущим устройством.



Рис. 5. Конструкция образца для исследования прочности КМ на смятие.

Для изучения зависимости прочности на смятие от структуры КМ и направления действия силы использовали углепластик КМУ-4э, физико-механические свойства которого приведены на рис. 6.

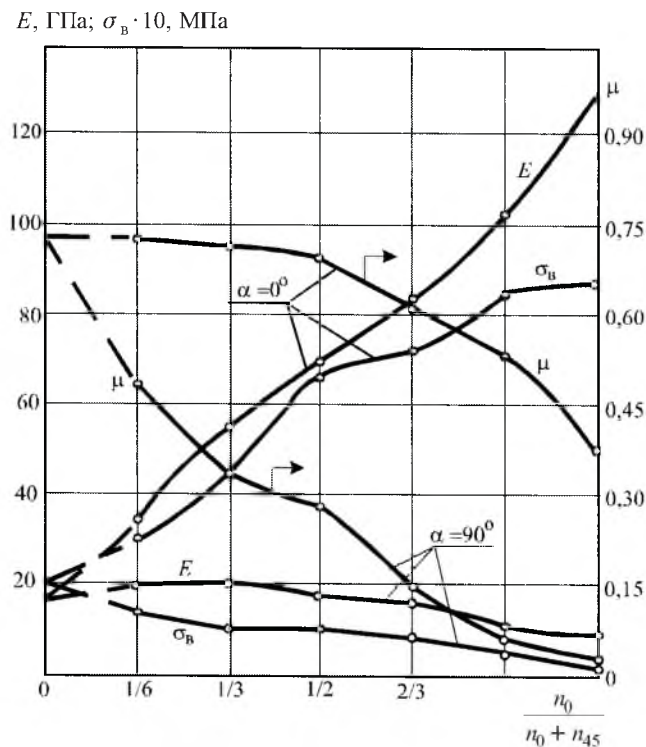


Рис. 6. Физико-механические свойства углепластика КМУ-4э.

Испытывали 12-, 18- и 24-слойные диски-пластины (рис. 5). Это обусловлено тем, что при малых толщинах пакета слоев КМ исследование его структуры затруднено, при больших толщинах разрушение КМ от смятия крепежными элементами с диаметром менее 1 мм невозможно. Штифты располагали по радиальным направлениям таким образом, чтобы расстояние между двумя любыми крепежными элементами составляло не менее 20 мм. Для каждого типоразмера и направления испытывали 5–7 штифтов. С целью исследования влияния последовательности укладки слоев по толщине пакета 24-слойные пластины формовали с двумя различными, но симметричными структурами: с нуль-градусными слоями внутри и снаружи пакета.

Установку и фиксацию штифтов в процессе формования осуществляли с помощью двух втулок из фторопластика, в которых предварительно просверливали направляющие отверстия.

После испытания заформованных крепежных элементов в тех же дисках просверливали отверстия и определяли прочность на смятие при традиционной технологии установки крепежных элементов.

На рис. 7 в качестве примера показаны результаты испытаний одной из структур КМ с цилиндрическими штифтами разного диаметра (штрихом обозначен разброс прочности на смятие).

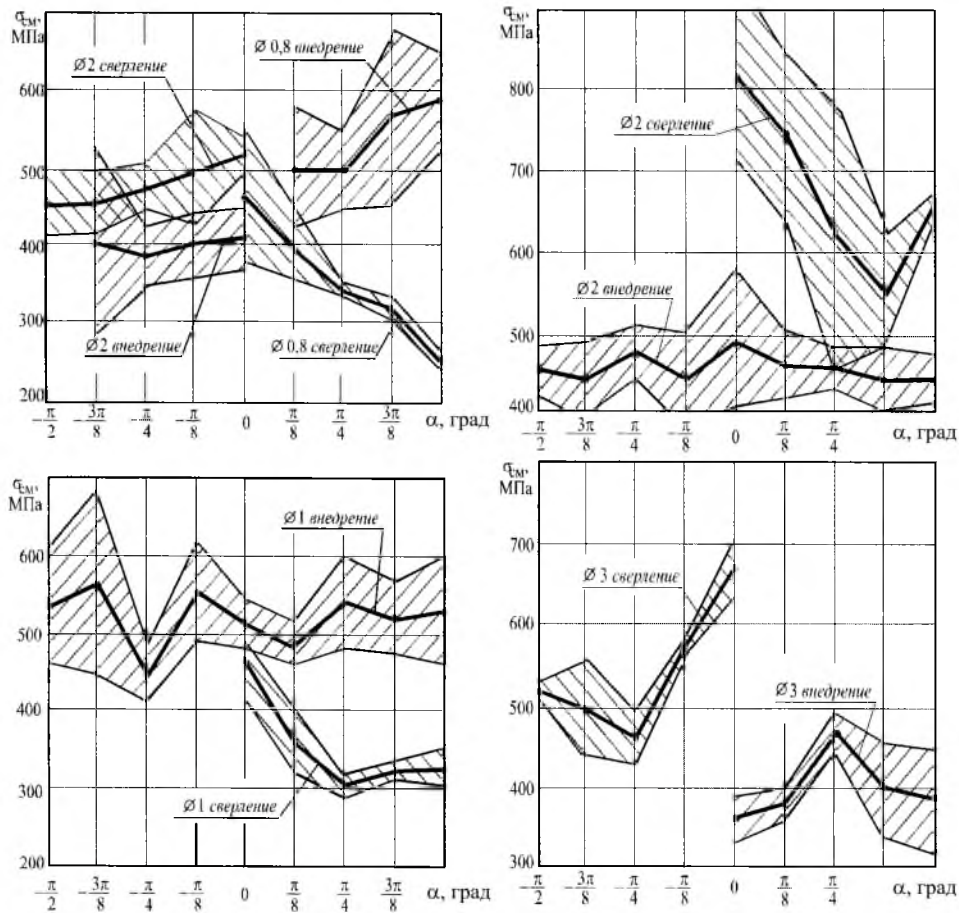


Рис. 7. Экспериментальное исследование анизотропии прочности КМ на смятие.

Анализ экспериментальных данных показал, что для большинства исследованных КМ (угле-, стекло-, органопластик) и их структур степень анизотропии прочности на смятие находится в пределах разброса этих характеристик. Это позволяет осреднить прочность КМ на смятие по направлению приложения усилия (на рис. 5 угол α), что существенно упрощает проектирование соединений. В табл. 1 приведены результаты опытов. Как видно, уровень разброса значений прочности на смятие вполне допустимый.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют:

прочность КМ на смятие существенно зависит от диаметра крепежных элементов как для заформованных штифтов, так и для установленных в отверстия, просверленные после полимеризации;

при диаметре крепежных элементов менее 1,6 мм прочность углепластика на смятие больше для заформованных штифтов;

внедренные в препрег крепежные элементы имеют более стабильные свойства;

наименьшей прочностью на смятие обладают однонаправленные углепластики;

для получения достоверных характеристик необходимо, чтобы отношение диаметра к толщине КМ было менее единицы;

не обнаружено однозначной взаимосвязи между механическими свойствами углепластика (рис. 8) и прочностью на смятие;

прочность на смятие стекло- и органопластика больше, чем углепластика, что, вероятно, связано с тканной структурой армирующего материала (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

Прочность углепластика на смятие

Структура КМ	d , мм	$\sigma_{см}$, МПа	ν , %	Структура КМ	d , мм	$\sigma_{см}$, МПа	ν , %
$[0^\circ_{12}]$	0,8	343	21,2	$[0^\circ_8, \pm 45^\circ_2, \mp 45^\circ_2, 0^\circ_8]$	2,0	383	12,4
$[0^\circ_{12}]$	1,0	278	19,1	$[0^\circ_8, \pm 45^\circ_2, \mp 45^\circ_2, 0^\circ_8]$	3,0	357	23,4
$[0^\circ_{12}]$	2,0	217	1,3	$8,7[0^\circ_6, \pm 45^\circ_3, \mp 45^\circ_3, 0^\circ_6]$	2,0	393	7,1
$[\pm 45^\circ_2, 0^\circ_4, \mp 45^\circ_2]$	0,8	540	8,7	$[0^\circ_6, \pm 45^\circ_3, \mp 45^\circ_3, 0^\circ_6]$	3,0	324	13,2
$[\pm 45^\circ_2, 0^\circ_4, \mp 45^\circ_2]$	1,0	518	7,3	$[0^\circ_4, \pm 45^\circ_4, \mp 45^\circ_4, 0^\circ_4]$	2,0	531	8,6
$[\pm 45^\circ_2, 0^\circ_4, \mp 45^\circ_2]$	2,0	401	2,1	$[0^\circ_4, \pm 45^\circ_4, \mp 45^\circ_4, 0^\circ_4]$	3,0	455	5,0
$[\pm 45^\circ_3, \mp 45^\circ_3]$	0,8	594	7,9	$[0^\circ_2, \pm 45^\circ_5, \mp 45^\circ_5, 0^\circ_2]$	2,0	574	7,1
$[\pm 45^\circ_3, \mp 45^\circ_3]$	1,0	601	5,9	$[0^\circ_2, \pm 45^\circ_5, \mp 45^\circ_5, 0^\circ_2]$	3,0	425	7,5
$[\pm 45^\circ_3, \mp 45^\circ_3]$	2,0	443	4,2	$[\pm 45^\circ_6, \mp 45^\circ_6]$	2,0	511	3,1
$[0^\circ_{18}]$	0,8	483	15,5	$[0^\circ_{24}]$	2,0	352	2,8
$[0^\circ_{18}]$	1,6	356	10,1	$[\pm 45^\circ, 0^\circ_{20}, \mp 45^\circ]$	2,0	411	14,8
$[0^\circ_{18}]$	2,0	287	19,4	$[\pm 45^\circ, 0^\circ_{20}, \mp 45^\circ]$	3,0	420	6,7
$[\pm 45^\circ_3, 0^\circ_6, \mp 45^\circ_3]$	0,8	661	2,0	$[\pm 45^\circ_2, 0^\circ_{16}, \mp 45^\circ_2]$	2,0	477	4,3
$[\pm 45^\circ_3, 0^\circ_6, \mp 45^\circ_3]$	1,6	581	1,9	$[\pm 45^\circ_2, 0^\circ_{16}, \mp 45^\circ_2]$	3,0	400	6,8
$[\pm 45^\circ_3, 0^\circ_6, \mp 45^\circ_3]$	2,0	529	7,0	$[\pm 45^\circ_3, 0^\circ_{12}, \mp 45^\circ_3]$	2,0	462	6,2
$[\pm 45^\circ_5, \mp 45^\circ_4]$	0,8	640	3,3	$[\pm 45^\circ_3, 0^\circ_{12}, \mp 45^\circ_3]$	3,0	400	10,5
$[\pm 45^\circ_5, \mp 45^\circ_4]$	1,6	577	4,7	$[\pm 45^\circ_5, 0^\circ_4, \mp 45^\circ_5]$	2,0	548	1,8
$[\pm 45^\circ_5, \mp 45^\circ_4]$	2,0	495	7,9	$[\pm 45^\circ_5, 0^\circ_4, \mp 45^\circ_5]$	2,0	474	7,5
$[0^\circ_{24}]$	2,0	352	2,8	$[\pm 45^\circ_5, 0^\circ_4, \mp 45^\circ_5]$	3,0	500	2,9
$[0^\circ_{10}, \pm 45^\circ, \mp 45^\circ, 0^\circ_{10}]$	2,0	283	16,1	$[\pm 45^\circ_6, \mp 45^\circ_6]$	2,0	511	3,1
$[0^\circ_{10}, \pm 45^\circ, \mp 45^\circ, 0^\circ_{10}]$	3,0	272	15,2				

Испытания анизотропного углепластика (углеродная лента ЛУП-0,1 и связующее ЭНФБ) со структурой $[0^\circ_8, \pm 45^\circ_3, 90^\circ_3 + 20^\circ_2]$ проводили на образцах, имеющих традиционную форму и размеры (рис. 8,а). Результаты испытаний показали (рис. 8,б-г):

между прочностью материала на растяжение и смятие нет корреляционной зависимости;

расстояние между штифтами в ряду (количество крепежных элементов в ряду при одинаковой ширине образца) существенно влияет на прочность на смятие (рис. 8,б);

анизотропией прочности на смятие, как и в предыдущем случае, можно пренебречь (рис. 8,в);

для всех структур и диаметров прочность на смятие практически выше, чем прочность на растяжение (рис. 8,г).

Т а б л и ц а 2

Прочность на смятие ортогонально армированных КМ

КМ	$\sigma_{см}$, МПа	ν , %
Углепластик (0/90) ₁₂	511	3,1
Стеклопластик	759	4,3
Органопластик	744	3,1

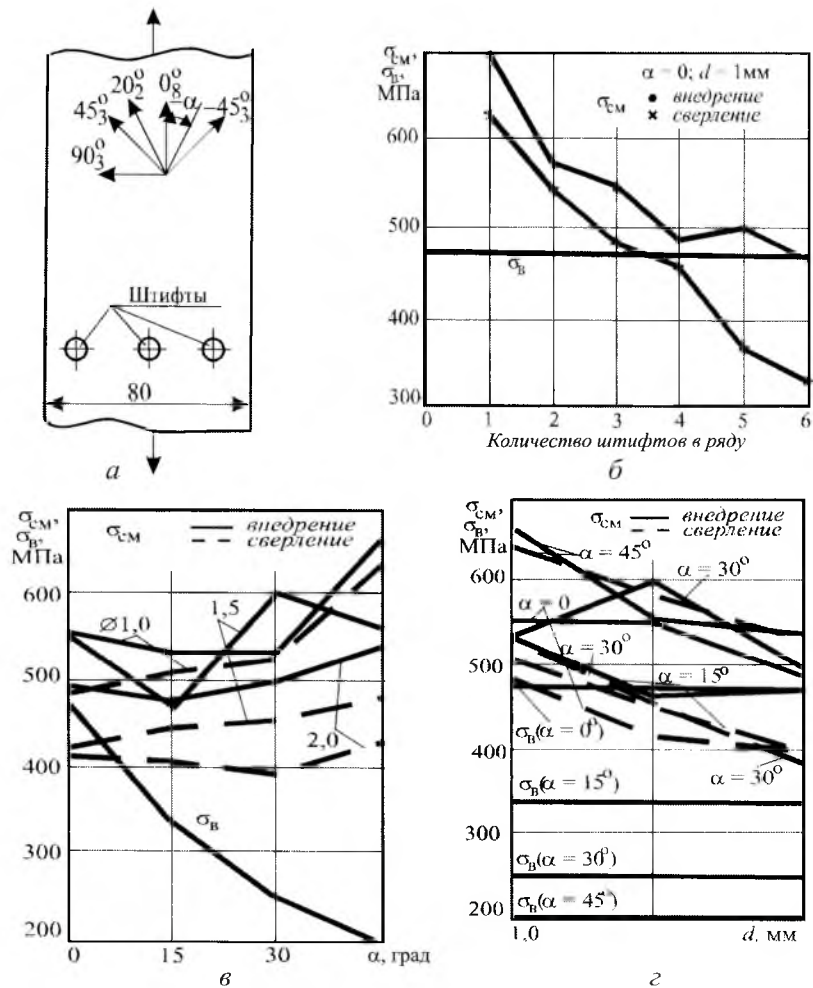


Рис. 8. Результаты исследования прочности на смятие анизотропного КМ.

Учитывая технологичность образования крепежных элементов фрезерованием, на специальных образцах (рис. 9) исследовали прочность углепластика со свойствами и структурой, приведенными в табл. 3.

Анализ некоторых результатов испытаний показал, что такая характеристика, как прочность на смятие КМ пирамидальными крепежными элементами, является весьма условной величиной (табл. 4). Более целесообразным представляется рассмотрение интегральной характеристики – разрушающей нагрузки, определяемой экспериментально для реальных крепежных элементов.

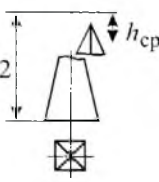
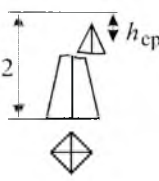
Т а б л и ц а 3

Физико-механические свойства КМ

№ структуры КМ	Структура КМ	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа	Коэффициент Пуассона
1	$[0^{\circ}_{14}, \pm 45^{\circ}_2]$	118,8	711,3	0,685
2	$[\pm 45^{\circ}_9]$	12,0	104,2	0,836
3	$[0^{\circ}_5, \pm 45^{\circ}_2, 90^{\circ}_2]$	66,2	376,9	0,328

Т а б л и ц а 4

Несущая способность КМ на смятие пирамидальными крепежными элементами

Вид крепежного элемента и ориентация основания	Размеры основания, мм	№ структуры КМ (см. табл. 3)	Разрушающая нагрузка, Н	Коэффициент вариации, %	Длина срезанной части $h_{ср}$, мм	Коэффициент вариации, %
	1,0 × 1,0	1	482	2,3	1,90	1,8
		2	479	2,9	1,90	2,0
		3	475	2,7	1,90	1,7
	1,5 × 1,5	1	888	4,7	0,89	2,4
		2	823	2,8	1,60	1,1
		3	696	4,6	1,58	1,1
	2,0 × 2,0	1	1377	7,5	0,65	3,6
		2	1581	1,6	0,95	3,1
		3	1315	4,3	0,80	3,4
	1,0 × 1,0	1	532	1,5	1,90	1,9
		2	539	1,4	1,90	2,1
		3	525	1,2	1,90	1,4
	1,5 × 1,5	1	1065	7,2	1,41	2,2
		2	1037	2,5	1,50	1,9
		3	906	7,1	1,60	1,5
	2,0 × 2,0	1	1432	4,7	0,80	4,8
		2	1622	1,9	0,60	5,2
		3	1560	1,6	0,70	5,0

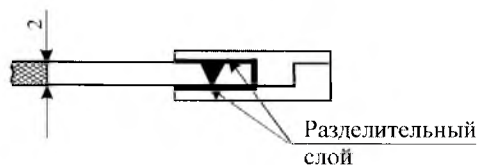


Рис. 9. Конструкция образцов для исследования прочности на смятие КМ пирамидальными крепежными элементами.

Особенность этих опытов заключается в характере разрушения. Для всех крепежных элементов с квадратным основанием наблюдается их срез на некотором расстоянии от вершины (табл. 4). Это обусловлено тем, что разрушение КМ от смятия начинается у основания штифта, впоследствии зона разрушения распространяется к вершине и по достижении равенства усилий смятия и среза разрушается крепежный элемент (в данных опытах материал штифтов – Д16АТ).

Прочность КМ на срез. В механических соединениях традиционно исследуется прочность деталей на срез между двумя соседними рядами или от первого (последнего) ряда до края деталей. Применение крепежа малого диаметра существенно увеличивает несущую способность на срез при постоянной суммарной площади их оснований. Рассмотрим вопрос о значимости условия прочности детали из КМ на срез.

Определим расстояние между рядами, при котором КМ не срезается:

$$2th \geq \frac{\pi d^2}{4} \tau_{к.э}, \quad (1)$$

где t – шаг между рядами; h , d – высота и диаметр крепежного элемента; $\tau_{к.э}$ – прочность материала штифта на срез.

Отсюда

$$\frac{t}{d} \geq \frac{\pi \tau_{к.э}}{8 \tau_{к.м}} \frac{d}{h}. \quad (2)$$

Прочность большинства современных полимерных КМ на срез равна [8]

$$\tau_{к.м} = 40 \dots 70 \text{ МПа.}$$

Тогда для алюминиевых ($\tau_{к.э} = 25$ МПа), титановых ($\tau_{к.э} = 600$ МПа) и деталей из стали 30ХГСА ($\tau_{к.э} = 1000$ МПа) ограничение (2) соответственно принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{t}{d} &\geq (2,5 - 1,4) \frac{d}{h}; \\ \frac{t}{d} &\geq (5,9 - 3,4) \frac{d}{h}; \\ \frac{t}{d} &\geq (10,0 - 5,6) \frac{d}{h}. \end{aligned} \quad (3)$$

При $h/d \geq 3$ из этих зависимостей следует, что при расчете клеештифтовых соединений для детали из КМ условие прочности на срез между соседними рядами можно не учитывать. Такой вывод обоснован еще и тем, что из условия сохранения количества волокон между двумя крепежными элементами следует зависимость

$$\frac{t}{d} = \frac{\theta_{\text{пр}}}{\theta_{\text{пр}} - \theta_0}, \quad (4)$$

где θ_0 – исходное (паспортное) значение объемного содержания волокон; $\theta_{\text{пр}}$ – предельное технологически реализуемое объемное содержание волокон.

Обычно $\theta_0 = 0,5 \dots 0,65$, $\theta_{\text{пр}} \leq 0,78$. Тогда из выражения (4) получим

$$\frac{t}{d} \geq (2,8 \dots 6). \quad (5)$$

Если это ограничение не соблюдается, то наблюдается увеличение толщины деталей, т.е. слои выходят из своей плоскости, искривляются волокна и снижается прочность КМ.

Выводы

1. Разработана система экспериментального обеспечения (образцы, устройства и методы испытаний) расчета на прочность соединений с трансверсальными крепежными элементами и проведена ее апробация на ряде КМ, типоразмеров штифтов и способах их установки.

2. Установлены некоторые зависимости коэффициентов снижения прочности в зоне установки, податливости и прочности на смятие от размера и формы крепежных элементов, структуры и типа КМ для заформованных и запрессованных в отверстия цилиндрических штифтов.

3. Подтверждено, что малоразмерный крепеж (до 1,6 мм) более эффективен при заформовке в КМ.

Резюме

Розроблено систему комплексного експериментального забезпечення розрахунку на міцність та проектування, до складу якої входять методики проведення експериментів, конструкції зразків і випробувальних пристроїв. Для з'єднань із кріпильними мікроелементами поперечного зв'язку наведено результати експериментального визначення коефіцієнтів податливості; ступеня зниження міцності вуглепластиків, що мають різну структуру, у зоні впровадження циліндричних (діаметр 0,8; 1,0; 1,5 і 2,0 мм) і пірамідальних (фрезерованих) штифтів; анізотропії міцності вугле-, скло- та органопластика на змінання у залежності від структури композиційного матеріалу, напрямку навантаження, розмірів кріпильних елементів та способу їх уста-

новления (проникання у пакет шарів препрега і спільне формування або установлення в просвердлені отвори після полімеризації композиційного матеріалу).

1. Карпов Я. С. Соединения высоконагруженных деталей из композиционных материалов. Сообщ. 1. Конструктивно-технологические решения и оценка их работоспособности // Пробл. прочности. – 2006. – № 3. – С. 23 – 33.
2. Карпов Я. С. Соединения высоконагруженных деталей из композиционных материалов. Сообщ. 2. Моделирование напряженно-деформированного состояния // Там же. – № 5. – С. 48 – 60.
3. Артюхин Ю. П. Напряжения в клеевых соединениях // Исследования по теории пластин и оболочек. – Киев: Изд-во Киев. гос. ун-та, 1973. – Вып. 10. – С. 3 – 27.
4. Леонова И. Е., Семин М. И. Экспериментальное исследование анизотропии прочности болтовых соединений слоистых композитов при варьировании геометрическими и конструктивными параметрами // Механика композитных материалов. – 1990. – № 2. – С. 268 – 272.
5. Ильина А. Д., Ильин Ю. С. Высокопрочные соединения композиционных материалов // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 42 – 49.
6. Корженевский А. В., Весельский С. И., Макаренко В. А. и др. Исследование прочности композиционных материалов на смятие // Вопр. проектирования и пр-ва конструкций летательных аппаратов. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1985. – С. 112 – 116.
7. Карпов Я. С., Макаренко В. А., Марченко В. Г. Исследование анизотропии прочности композиционных материалов на смятие крепежными элементами // Расчет и проектирование конструкций летательных аппаратов. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1989. – С. 82 – 91.
8. Ильина А. Д. Исходные прочностные характеристики композиционных материалов для проектирования механических соединений // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 23 – 33.

Поступила 05. 09. 2005