

Проектирование и изготовление авиационных конструкций из композиционных материалов

Новосибирск 2012

ВЕДЕНИЕ	3
1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ	3
2. ЗАДАНИЕ	3
3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ	7
4. УКАЗАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ	7
4.1. Особенности проектирования изделия из композиционных материалов	7
4.2. Определение необходимого количества слоев ПКМ	8
4.3. Формирование пакета	9
4.4. Определение механических характеристик пакета	13
4.5. Определение действующих напряжений в пакете	14
4.6. Выбор высоты сотового заполнителя	15
Список использованной литературы:	17

ВЕДЕНИЕ

Развитие авиационной техники и появление новых материалов привело к широкому распространению конструкций с различными заполнителями. Такие конструкции обладают высокими параметрами жесткости и удельной прочности, звуко- и виброизоляционными свойствами.

Современные композиционные материалы обладают не только широким спектром механических, физических и химических свойств, но и способностью к направленному их изменению в соответствии с назначением конструкции. Анизотропный характер свойств композитов предполагает, что наряду с высокими механическими характеристиками в одних направлениях они обладают низкими в других. Поэтому эффективная реализация достоинств этих материалов в конструкциях требует решения комплекса задач, связанных с выбором взаимно согласованных исходных компонентов, с определением рациональной структуры материала, соответствующей полю внешних нагрузок и других воздействий, с учетом его особенностей и технологических ограничений.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью расчетно-графической работы является закрепление теоретических знаний по основам проектирования и изготовления изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ), приобретение навыков самостоятельного решения задач проектирования укладки формуемого пакета, а так же определения механических характеристик получаемого пакета.

2. ЗАДАНИЕ

Расчетно-графическая работа состоит из следующих частей:

1. Расчет необходимой толщины пакета ПКМ исходя из условий заданного варианты.
2. Выбор высоты сотового наполнителя.
3. Определение механических характеристик и массы панели.
4. Изображение в виде эскиза пакета ПКМ с учетом ориентации слоев укладки ПКМ и сотового наполнителя.

Варианты заданий, включающих исходные данные для решения задач (размеры панели и расчетные нагрузки и марка материала), показаны на рис. 1 и в табл. 1. Основные механические свойства однонаправленных углепластиков при нормальных условия приведены в табл. 2.

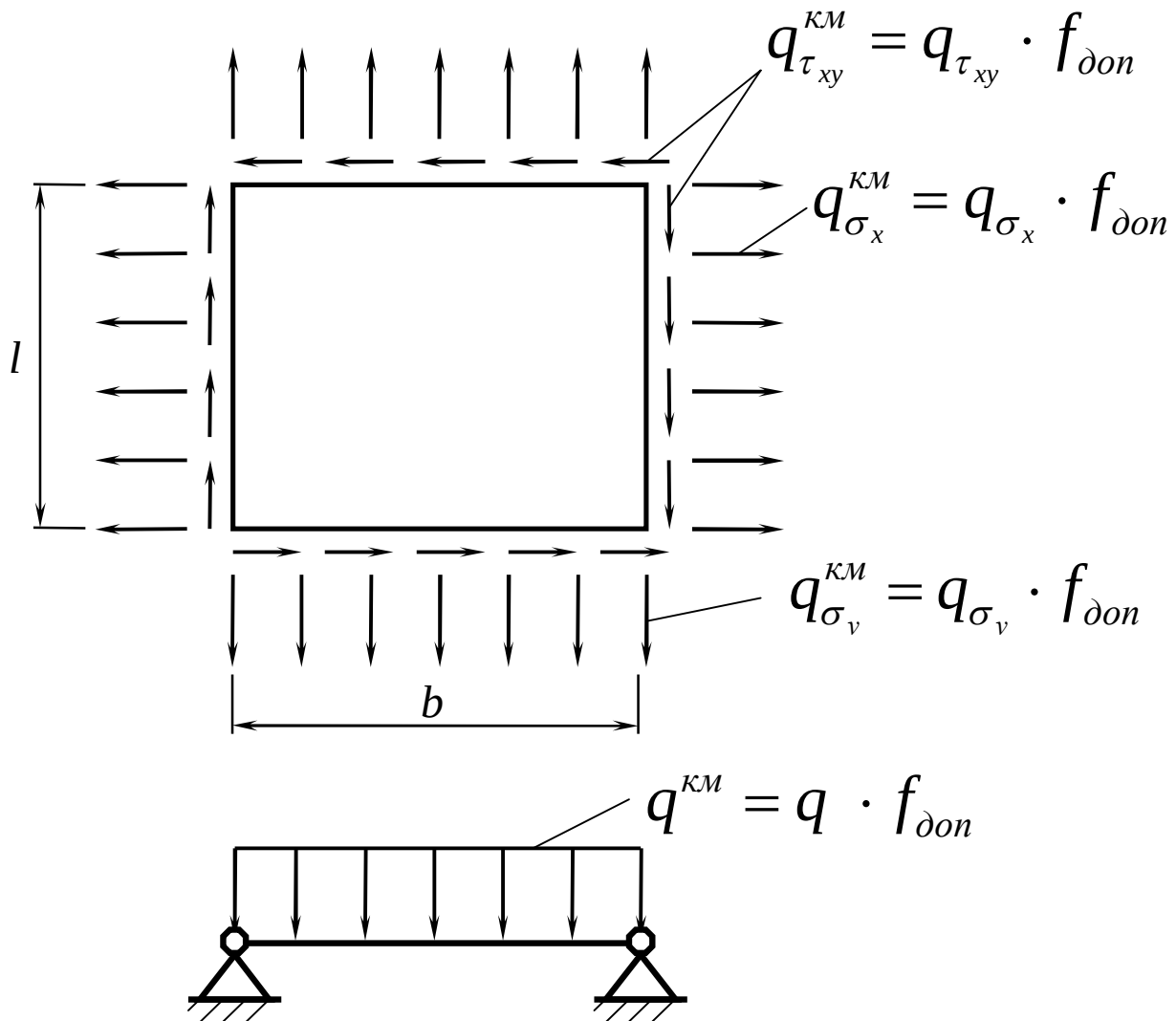


Рис. 1. Схема нагружения панели

Паспортными данными композиционного материала при нормальных и эксплуатационных температурах и влажностях являются:

σ_s^0 - предел прочности при растяжении вдоль направления 0° , к./мм²;

σ_{-B}^0 - предел прочности при сжатии вдоль направления 0° , кг/мм²;

$\tau_{0,90}$ - предел прочности при сдвиге вдоль направлений 0° и 90° , кг/мм²;

$\tau_{\pm 45^\circ}$ - предел прочности при сдвиге вдоль направлений 0° и 90° , кг/мм²;

E_ϵ^0 - модуль упругости при растяжении (сжатии) вдоль направления 0° , кг/мм²;

$G_{0,90}$ - модуль сдвига вдоль направлений 0° и 90° , кг/мм²;

μ - коэффициент Пуассона (для всех материалов принять $\mu=0,265$);

δ^1 - толщина монослоя (одного слоя), мм;

γ - удельный вес, г/см³.

Таблица 1. Варианты заданий

№ Вар.	l , мм	b , мм	$q_{\sigma x}$, кгс/мм	$q_{\sigma y}$, кгс/мм ²	$q_{\tau xy}$, кгс/мм ²	q , кгс/см ²	Марка материала
1	1500	400	30	20	10	0,5	КМУ-3ЛП
2	1200	500	50	30	15	1	КМУ-3Э
3	1000	600	20	15	20	0,5	КМУ-3К
4	1700	600	40	25	10	1,5	КМУ-3
5	1300	400	30	20	20	0,5	КМУ-4Л
6	1400	500	50	25	10	1	КМУ-4Э
7	1500	300	30	30	25	0,5	КМУ-2ЛП
8	1600	700	40	20	10	1,5	КМУ-6-41
9	1100	600	20	15	15	1	КМУ-3ЛП
10	1500	500	40	30	20	0,5	КМУ-3Э
11	1300	600	50	25	10	1,5	КМУ-3К
12	1000	400	40	20	25	0,5	КМУ-3
13	1400	500	30	15	10	1,5	КМУ-4Л
14	1700	300	40	30	15	0,5	КМУ-4Э
15	1200	700	50	15	25	1	КМУ-2ЛП
16	1000	600	40	30	20	0,5	КМУ-6-41
17	1700	400	20	15	10	1	КМУ-3ЛП
18	1300	500	30	25	25	1,5	КМУ-3Э
19	1500	300	50	20	15	1	КМУ-3К
20	1400	700	40	30	10	0,5	КМУ-3

Таблица 2. Свойства углепластиков КМУ

Марка материала	γ	σ_6^0	σ_{-6}^0	E_6^0	$G_{0,90}$	$\tau_{0,90}$	δ^1
	г/см ³	кгс/мм ²	кгс/мм ²	кгс/мм ²	кгс/мм ²	кгс/мм ²	мм
КМУ-3ЛП	1,5	75	60	15000	550	2	0,10
КМУ-3Э	1,5	90	80	13500	550	4	0,12
КМУ-3К	1,5	90	30	27000	514	5	0,08
КМУ-3	1,5	110	45	19000	514	7	0,30
КМУ-4Л	1,5	70	60	13500	570	2	0,10
КМУ-4Э	1,5	85	90	9000	610	5	0,12
КМУ-2ЛП	1,4	65	65	12000	550	2	0,10
КМУ-6-41	1,5	70	40	11000	650	6	0,10

Таблица 3. Состав ПКМ на основе углеродных волокон

Марка материала	Тип и марка наполнителя	Марка связующего	Режим полимеризации	Интервал рабочих температур
КМУ-3ЛП	Углерента ЛУ-П-0,1 ЛУ-П-0,2	5-2ПБ	150±5°C (4 часа)	-60...+80°C
КМУ-3Э	Углерента ЭЛУР-П-01	5-2ПБ	150±5°C (4 часа)	-60...+80°C
КМУ-3К	Углерента КУЛОН-П	5-211Б	150±5°C (4 часа)	-60...+80°C
КМУ-3	Углеволокно ВМН-4	5-211Б	150±5°C 180±5°C 200±5°C (4 часа)	-60...+100°C -60...+120°C -60...+150°C
КМУ-4Л	Углерента ЛУ-П-0,1 ЛУ-П-0,2	ЭНФБ	160±5°C (6 часов)	-60...+150°C
КМУ-4Э	Углерента ЭЛУР-П-01	ЭНФБ	175±5°C (6 часов)	-60...+150°C
КМУ-2ЛП	Углерента ЛУ-П-0,1	СП-97	200±5°C (2 часа) 250±5°C (5 часов)	-60...+300°C
КМУ-6-41	Углерента ЛУ-П-0,1	ВК-41	120±5°C (4 час.)	-60...+80°C

Внимание! В формулах используются значение без преобразования величин.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Решение задачи выполняется по следующим этапам.

1. Постановка задачи и исходные данные, индивидуальные для каждого варианта. К исходным данным относятся: эскиз детали (зарисовать) с необходимыми размерами, марка материала и его физические характеристики.
2. Расчет необходимого количества слоев в обшивках с ориентацией 0° , $\pm 45^\circ$, 90° в зависимости от действующих нагрузок.
3. Выбор сотового заполнителя и расчет его высоты.
4. Уточнение действующей нагрузки и расчет в соответствии с уточненной нагрузкой.
5. Поверочный расчет конструкции.

4. УКАЗАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

4.1. Особенности проектирования изделия из композиционных материалов

Современные волокнистые полимерные композиционные материалы (ПКМ), к которым относятся угле-, стекло и органопластики являются анизотропными материалами. Это отличие дает возможность регулировать механические характеристики проектируемых конструкций за счет изменения ориентации при укладке волокон армирующих элементов. В свою очередь, это требует учета при расчетах и при проектировании.

При формировании расчетных нагрузок необходимо исходить из условий нагружения и условий эксплуатации, а так же из существующей нестабильности несущих свойств конструкций из композиционных материалов. Поэтому расчетные нагрузки должны определяться при соответствующих им параметрам окружающей среды, а статический расчет конструкции необходимо проводить, используя паспортные данные, соответствующие конкретным условиям эксплуатации, а так же необходимо учитывать снижение механических характеристик изделий из полимерных композиционных материалов со временем.

Кроме того, в соответствии с Авиационными Правилами для силовых частей, узлов, деталей и элементов конструкции самолета, выполненных из композиционных материалов, вводится дополнительный коэффициент безопасности $f_{\text{доп}}$, величина дополнительного коэффициента безопасности определяется в зависимости от разброса несущих свойств данных конструкций. Для расчетов примем $f_{\text{доп}}$ равным 1,25.

4.2. Определение необходимого количества слоев ПКМ

Свойства ПКМ зависят от направления, поэтому, прежде всего необходимо указать оси, относительно направления которых будет определяться ориентация основы композиционного материала или основы ткани. Графически это должно выглядеть следующим образом (рис. 2):

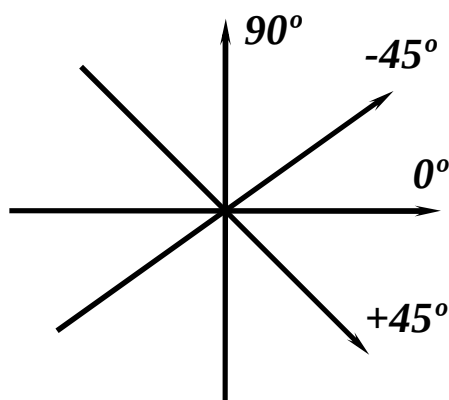


Рис. 2. Обозначение ориентации осей для КМ на чертеже

В большинстве случаев направление оси 0° выбирают совпадающим с самолетными осями (X, Y, Z) или с направлением максимальной нагрузки. В любом случае на поле чертежа необходимо указывать направление осей и направление, соответствующее направлению оси 0° (параллельно оси лонжерона, балки, строительной горизонтали, вдоль длинной стороны детали и т.д.). Положительными считаются углы, отсчитанные по ходу часовой стрелки от направления 0° .

Определение толщины композиционного материала δ в направлениях 0° , $\pm 45^\circ$, 90° производится по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \delta^0 &= \frac{q_{\sigma_x}^{KM}}{\sigma_{\theta}^0}, мм; \\ \delta^{90} &= \frac{q_{\sigma_y}^{KM}}{\sigma_{\theta}^0}, мм; \\ \delta^{\pm 45} &= \frac{q_{\tau_{xy}}^{KM}}{\tau^{\pm 45}}, мм. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Количество слоев композиционного материала для каждого направления укладки определяется исходя из необходимой толщины материала и толщины монослоя δ^1 (2) и округляются до целого числа в большую сторону, а для слоев с ориентацией ± 45 в большую сторону до ближайшего четного числа:

$$\left. \begin{aligned} n_{cl}^0 &= \frac{\delta^0}{\delta^1}; \\ n_{cl}^{90} &= \frac{\delta^{90}}{\delta^1}; \\ n_{cl}^{\pm 45} &= \frac{\delta^{\pm 45}}{\delta^1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

4.3. Формирование пакета

Далее необходимо спроектировать схему укладки пакета. Прежде всего, нужно ввести способ обозначения слоев. Самым технологически удобным вариантом является нумерация слоев, начиная от оснастки: сначала укладывается слой №1, далее №2 и т.д. (см. рис. 3). В случае толстых пакетов наиболее рационально указывать на чертеже номер слоя, а ориентацию приводить в отдельной таблице на чертеже.

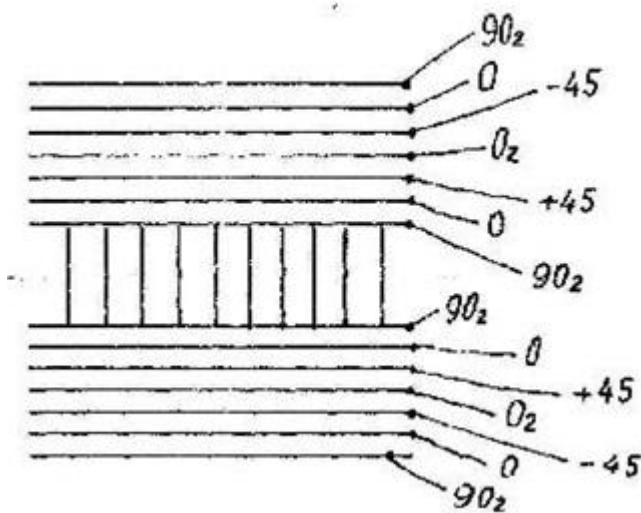


Рис. 3. Схема выкладки слоев (без нумерации).

Следующей технологической проблемой является усадка и поводка деталей во время обработки. На усадку влияют главным образом два фактора – усадка связующего и разность коэффициентов теплового расширения собранного пакета и оснастки. При этом необходимо учитывать тот факт, что армирующие материалы имеют различные коэффициенты теплового расширения в продольном и поперечном направлении. Усадку устраняют с помощью введения поправок на размеры и применяя в оснастке материалы с малым коэффициентом теплового расширения. Поводку можно минимизировать, если спроектировать сбалансированную укладку[3]:

1. Необходимо соблюдение принципа симметрии расположения слоев, т.е. количество, ориентация и расположение слоев относительно нейтральной оси обшивки должны быть одинаковыми. Например, для четного количества слоев может быть схема $0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ \mid -45^\circ, +45^\circ, 90^\circ, 0^\circ$, где вертикальная черта (|) обозначает нейтральную ось; для нечетного количества слоев может быть схема $0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 90^\circ, 0^\circ$, где черта над слоем 0° указывает на то, что данный слой располагается на оси симметрии. Приведенные примеры относятся к обшивке с количеством слоев $\pm 45^\circ$ кратным 4.

2. Для обшивки с количеством слоев $\pm 45^\circ$ кратным 2 нет возможности соблюсти полную симметрию, поэтому для уменьшения отрицательного влияния несимметрии (при несимметрии обшивки могут "закрутиться") необходимо одну

пару слоев с разными знаками располагать около оси симметрии, например, иметь схему $0^\circ, 90^\circ, +45^\circ \mid -45^\circ, 90^\circ, 0^\circ$ или $0^\circ, +45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, +45^\circ \mid -45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, +45^\circ, 0^\circ$. Во всех случаях необходимо соблюдать условие, чтобы количество слоев с ориентацией $+45^\circ$ было равно количеству слоев с ориентацией -45° , так как эти слои работают на сдвиг при одновременном растяжении-сжатии по противоположным диагоналям.

3. При изготовлении обшивки методом выкладки расположение слоев с ориентацией 45° может быть различным. Например, когда слои $\pm 45^\circ$ располагаются вместе: $0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ \mid -45^\circ, +45^\circ, 90^\circ, 0^\circ$ или когда между слоями $+45^\circ$ и -45° располагается слой 90° : $0^\circ, +45^\circ, 90^\circ, -45^\circ \mid -45^\circ, 90^\circ, +45^\circ, 0^\circ$. Вторая схема более предпочтительна по сравнению с первой, так как между слоями 0° и 90° располагается слой $+45^\circ$, что оказывается на уменьшении остаточных термических (усадочных) напряжений между слоями, которые максимальны при контакте слоев 0° и 90° .

4. При изготовлении сотовой конструкции с обшивками из ПКМ методом совмещенного формования (при этом обе "сырые" обшивки одновременно формуются и полимеризуются на сотовом заполнителе) в случаях, когда по количеству слоев и их ориентации нет возможности соблюсти симметрию каждой из обшивок, состоящих из 4-х - 5-ти слоев, необходимо строго соблюсти конструктивную симметрию, например (рис. 4.):

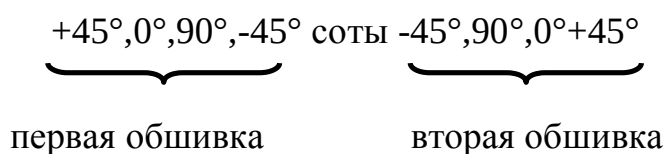


Рис. 4. Ориентация слоев в пакете с сотовым заполнителем

или $+45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, -45^\circ$ соты $-45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, +45^\circ$. Данное условие проверено на практике и поводов конструкции не наблюдалось, хотя отдельно каждая из обшивок резко несимметричная. Обязательным условием является четкое оформление чертежа, в котором необходимо указать схему с симметричным расположением слоев обшивок относительно сотового заполнителя.

5. При изготовлении сотовых конструкций методом совмещенного формования необходимо слои с ориентацией 0° , т.е. слои, определяющие прочность в направлении действия максимальных усилий, располагать не непосредственно на сотовом заполнителе, а внутри пакета (3-й слой и глубже). Например, вместо схемы укладки $0^\circ, +45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, +45^\circ, 0^\circ$, когда слой 0° контактирует с сотовым заполнителем, составляется из слоев, расположенных в направлении к продольной оси панели, и из слоев 90° в количестве 10-20%, необходимых для восприятия усилий по хорде кессона и создания необходимой жесткости обшивки. Кроме того, по требованиям живучести в обшивке необходимы стопперы, ограничивающие распространение трещин.

Стопперами могут служить продольные слои обшивки, сконцентрированные в местах постановки стрингеров.

Полки стрингеров должны иметь подавляющее количество слоев, расположенных вдоль. Однако для связи этих слоев между собой для создания монолитности материала полок требуется какое-то количество слоев (10-30%), расположенных под углами -45° . Эти же слои необходимы для обеспечения достаточной величины критического напряжения свободных полок. Стенки стрингеров целесообразно армировать под углами -45° и небольшим количеством слоев (10-20%) под углом 90° .

Для сотовых конструкций, у которых существуют две обшивки, количество слоев обшивке должно быть изменено, исходя из того, что обе обшивки должны иметь одинаковое количество слоев (см. рис. 5). При проектировании конструкций, изготавливаемых по совмещенной технологии, слои с 0° (т.е. слои, располагаемые в направлении действия максимальной нагрузки) необходимо располагать внутри пакета, а не выносить их на контакт с сотами. Предпочтительнее всего, если с сотами будет контактировать слой 90° .

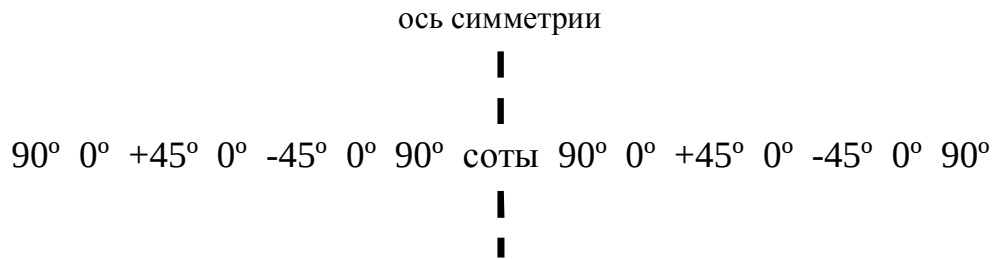


Рис. 5. Схема укладки слоев ПКМ с учетом сотового заполнителя

Наличие в приведенном примере несимметричных обшивок для сотовых конструкций при соблюдении конструктивной симметрии (ось симметрии располагается в середине сот) возможно в том случае, если данная конструкция изготавливается по совмещенной технологии, т.е. когда процесс полимеризации обеих обшивок и склейка их с сотовым заполнителем происходит одновременно. В этом случае поводок изготовленной конструкции не будет. Если одна из несимметричных обшивок на сборку поставляется в отвержденном виде, то не только она будет иметь поводки, но и вся конструкция будет иметь неустранимые отклонения от поверхности оснастки, которые могут быть значительны. В данном случае проявляется влияние технологии изготовления на качество конструкции и на конструкцию в целом, т.к. если выбирается традиционная технология, при которой на сборку поставляются обе обшивки отвержденными, а затем производится их склейка с сотовым заполнителем, то в данном случае обшивки должны состоять из строго симметрично расположенных слоев, что приведет к их увеличению, а, следовательно, к увеличению веса и стоимости конструкции.

4.4. Определение механических характеристик пакета

Для определения механических характеристик укладки со смешанной ориентацией (0° , $\pm 45^\circ$, 90°) расчет характеристик пакета для направлений X , Y , $\sigma_{\theta x}$, $\sigma_{\theta y}$, $E_{\theta x}$, $E_{\theta y}$ можно воспользоваться следующими формулами [4]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta x, y}^{KM} &= K_y^{x, y} \cdot \sigma_{\theta}^0, \text{ кгс / мм}^2; \\ E_{\theta x, y}^{KM} &= K_y^{x, y} \cdot E_{\theta}^0, \text{ кгс / мм}^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $K_y^{x, y}$ - коэффициенты укладки для направлений X , Y соответственно:

$$K_y^{x,y} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{n} + 0,25 \frac{n_{45}}{n}$$

где n_i – количество слоев i -го угла ориентации для направлений X , Y соответственно;

n – суммарное количество слоев.

Для определения τ_{θ} можно использовать правило смеси:

$$\tau_{\theta_{xy}} = \frac{(n_0 + n_{90})}{n} \cdot \tau_{0,90} + \frac{n_{45}}{n} \tau_{45}, \text{ кг / мм}^2 \quad (4)$$

где n_0 , n_{90} и n_{45} – количество слоев с ориентацией 0° , 90° , $\pm 45^\circ$ соответственно;

τ_{45} – предел прочности укладки $\pm 45^\circ$, для материалов КМУ $\tau_{45} = 29 \text{ кг / мм}^2$.

4.5. Определение действующих напряжений в пакете

Толщина пакета определяется по формуле:

$$\delta^{KM} = \delta^1 \cdot n, \text{ мм} \quad (5)$$

Действующие напряжения определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^{KM} &= \frac{q_{\sigma_x}^{KM}}{\delta^{KM}}, \text{ кг / мм}^2; \\ \sigma_y^{KM} &= \frac{q_{\sigma_y}^{KM}}{\delta^{KM}}, \text{ кг / мм}^2; \\ \tau_{xy}^{KM} &= \frac{q_{\tau_{xy}}^{KM}}{\delta^{KM}}, \text{ кг / мм}^2; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Далее необходимо определить предельное состояние пакета по действию комбинированных нагрузок по критерию Цая-Хилла для случая плоского напряженного состояния [3]:

$$\left[\frac{\sigma_x^{KM}}{[\sigma_{\theta_x}^{KM}]} \right]^2 - \frac{\sigma_x^{KM} \cdot \sigma_y^{KM}}{[\sigma_{\theta_x}^{KM}]^2} + \left[\frac{\sigma_y^{KM}}{[\sigma_{\theta_y}^{KM}]} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{xy}^{KM}}{[\tau_{\theta_{xy}}^{KM}]} \right]^2 \leq 1 \quad (7)$$

4.6. Выбор высоты сотового заполнителя

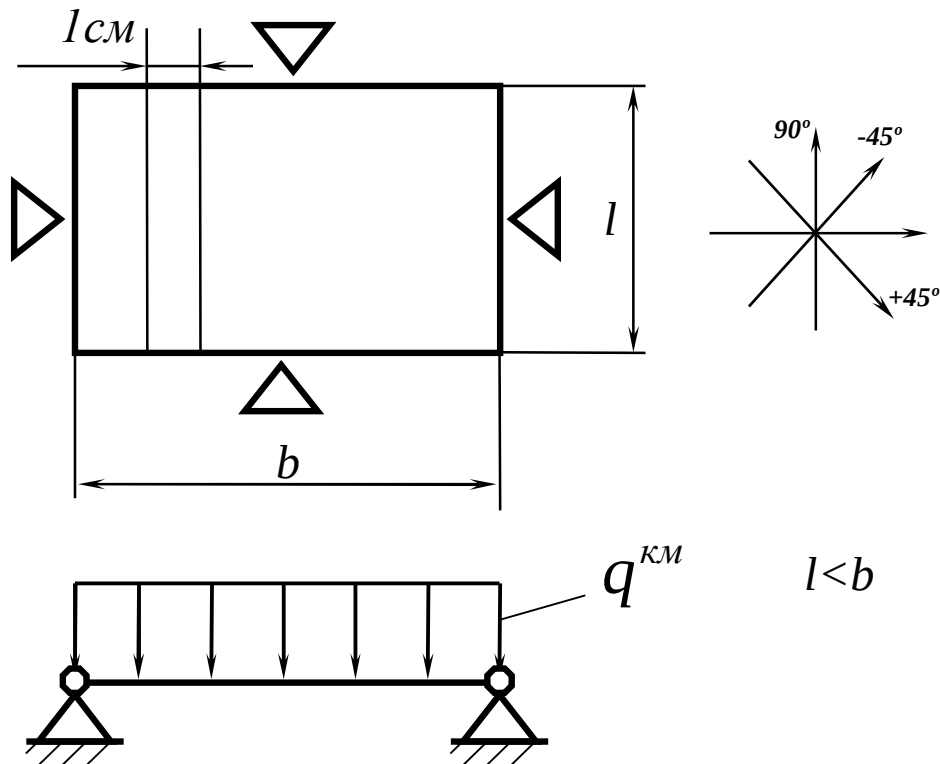


Рис. 6. Схема нагружения панели

Для случая панели с данной схемой нагружения и с шарнирными опиранием по контуру максимальный изгибающий момент M_{max} , перерезывающая сила Q_{max} [1] (длина l в см, q – давление на полосу шириной 1 см кг/см):

$$M_{max} = \frac{q^{кМ} \cdot l^2}{8}, \text{ кг} \cdot \text{см};$$

$$Q_{max} = \frac{q^{кМ} \cdot l}{2}, \text{ кг} \quad (8)$$

Для выбранного типа сотового заполнителя определим необходимую высоту (по ОСТ 100728-75 используем соты с ячейкой $a=2,5$ мм, толщиной фольги 0,04 мм и $\tau_{xy}=22$ кг/см²):

$$h_{com} = \frac{Q_{max}}{\tau_{xz}}, \text{ см} \quad (9)$$

Определим необходимую толщину и необходимое количество слоев ПКМ:

Для этого определим действующую в обшивках силу $P_{\sigma_y}^{кМ}$ от момента M_{max} :

$$P_{\sigma_y}^{KM} = \frac{M_{\max}}{h_{com}}, \text{ кг} \quad (10)$$

Далее определим необходимую толщину (11):

$$\delta_{KM} = \frac{P_{\sigma_y}^{KM}}{10\sigma_{\epsilon}^0}, \text{ мм} \quad (11)$$

где σ_{ϵ}^0 - наименьшая из величин σ_{ϵ}^0 и $\sigma_{-\epsilon}^0$

и необходимое количество слоев ПКМ (12):

$$n_{cl} = \frac{\delta_{KM}}{\delta^1}; \quad (12)$$

В случае если потребуется увеличение количества слоев, провести корректировку укладки. Необходимо учитывать тот факт, что при испытаниях на растяжение и на сжатие образцов из КМУ в случае если с сотами с ячейкой 2,5 мм контактируют два слоя с направлением 90° , а слой 0° является третьим слоем, то потери прочнее нет; если с сотами контактируют слои $\pm 45^\circ$, то прочность уменьшается на 5-7, а если с сотами контактируют слои 0° , то прочность уменьшается на 10-12%.

Поэтому на поле чертежа обязательно указывают ориентацию клеевых полос сотового заполнителя (см. рис. 7). При неверной ориентации соты могут потерять прочность от сдвига.

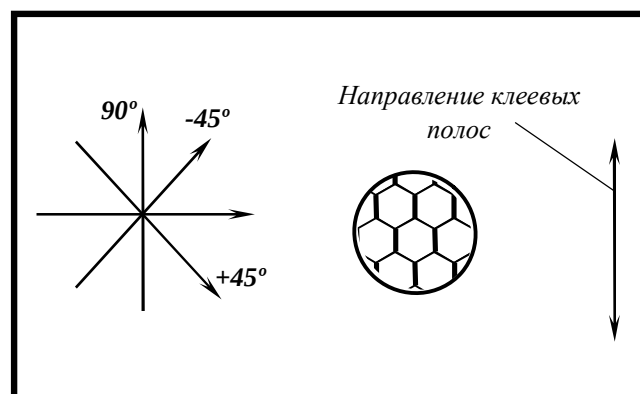


Рис. 7. Схема ориентации сот

Список использованной литературы:

1. Атапин В.Г., Пель А.Н., Темников А.И. Сопротивление материалов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006.- 556 с. («Учебники НГТУ»).
2. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. – Москва: Изд-во НОТ, 2008. – 822 с.
3. Попов Ю.И., Резниченко В.И. Проектирование и изготовление узлов и деталей планера самолёта из композитных материалов: Учебное пособие по курсовому проектированию. - М.: МАИ, 1994 г. – 68 с.
4. Трунин Ю.П., Ушаков А.Е. Некоторые вопросы оценки и обеспечения эксплуатационной живучести конструкций планера самолета, выполненных из композиционных материалов.—В кн.: Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов: Руководящие технические материалы. - М.: Изд. ЦАГИ, 1984, вып. X.[5, С.387].