

Б.И. Гиясов, Н.Г. Серёгин, Д.Н. Серёгин

ТРЁХСЛОЙНЫЕ ПАНЕЛИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Издательство АСВ
Москва
2015

Рецензенты:

проректор по научной работе, зав. кафедрой геодезии и строительного дела Московского государственного университета леса, д.т.н.,
проф. *В.И. Запруднов*;

профессор кафедры геодезии и строительного дела Московского государственного университета леса, к.т.н. *В.В. Стриженко*;

профессор кафедры технологии древесных плит и пластиков и строительного дела Московского государственного университета леса, к.т.н. *А.А. Никитин*

Гиясов Б.И., Серёгин Н.Г., Серёгин Д.Н.

Трёхслойные панели из полимерных композиционных материалов: Учебн. пособие. – М: Издательство АСВ, 2015. – 64 с.

В данном учебном пособии рассмотрены конструкции трёхслойных панелей из полимерных композиционных материалов, их свойства и технологии изготовления, предназначенные для применения при проектировании уникальных зданий и сооружений.

Учебное пособие предназначено для студентов архитектурно-строительных специальностей с целью оказания им помощи в курсовом и дипломном проектировании.

ISBN 978-5-4323

© Издательский дом АСВ, 2015
© Гиясов Б.И., Серёгин Н.Г.,
Серёгин Д.Н., 2015

ВВЕДЕНИЕ

В связи с возросшими требованиями к современным уникальным зданиям и сооружениям широкое применение получили конструкции с высокой удельной прочностью, состоящие из меньшего количества деталей, соединяемых в единое целое при помощи склеивания, сварки и пайки. Решение этого вопроса облегчается с применением слоистых конструкций с заполнителем, представляющих собой листовые обшивки, между которыми установлен заполнитель, обеспечивающий совместную работу обшивок и необходимую жесткость конструкции.

Многослойные панели, состоящие из прочных тонких внешних слоев и расположенного между ними сотового заполнителя, являются одним из наиболее перспективных конструктивных элементов современных уникальных зданий и сооружений. Это обусловлено тем, что применение таких панелей решает две основные задачи: рациональное включение материала в работу по восприятию внешних нагрузок и обеспечение ряда других функциональных характеристик, таких как шумопоглощение, теплоизоляция и т.п.

В ряде случаев при выборе типа заполнителя на первый план выступают не только прочностные, но и другие характеристики, например: эффективное шумопоглощение, теплоизоляция, возможность удаления конденсата и т.п.

Целью данной работы является описание сотовых конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), их свойств и технологии изготовления.

Задачей работы является описание:

- 1) классификации и применения сотовых конструкций из ПКМ;
- 2) материалов для сотовых конструкций из ПКМ;
- 3) основных технологических этапов изготовления сотовых конструкций из ПКМ.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ

Сотовые конструкции из ПКМ представляют собой пространственную конструкцию, состоящую из следующих элементов: двух тонких прочных облицовочных пластин – обшивок, толстой легкой сердцевины – заполнителя, разделяющего несущие пластины и распределяющего нагрузку между ними, и адгезионных слоев, связывающих пластины с заполнителем и передающих нагрузку от заполнителя к облицовкам и обратно. На рис. 1.1 представлена типовая конструкция с сотовым заполнителем.

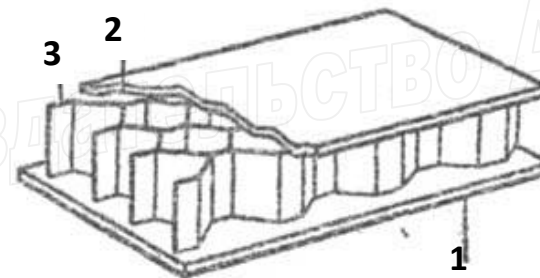


Рис. 1.1. Конструкция с сотовым заполнителем:
1 – обшивка; 2 – клеевая пленка; 3 – сотовый заполнитель

Общая устойчивость сотовых конструкций во много раз превышает устойчивость входящих в них листов. Повышенная устойчивость сотовых конструкций при сжатии и сдвиге позволяет конструировать их без подкрепляющего продольного и поперечного усиления, а слоистые агрегаты не нуждаются в промежуточных ребрах жесткости. Панели с сотовым заполнителем, обладая высокой устойчивостью, позволяют применять несущие обшивки малой толщины, что очень важно для снижения массы строительной конструкции.

Сотовые конструкции имеют следующие существенные преимущества:

- 1) большую удельную прочность (отношение предела прочности к массе);
- 2) более высокую жесткость и устойчивость при продольном сжатии;
- 3) лучшие характеристики по усталостной прочности, особенно в зонах с повышенными акустическими нагрузками;
- 4) более гладкую поверхность;

5) требуют меньшей трудоемкости при проектировании сборочных узлов;

6) включают меньшее количество деталей, составляющих узел или агрегат;

7) обладают повышенными тепло-, звукоизоляционными свойствами.

Сотовый наполнитель – самый перспективный на сегодняшний день материал для изготовления сверхлегких и прочных конструкций различного назначения. Сотовый наполнитель представляет собой ячеистую конструкцию (рис. 1.2). Форма ячеек наполнителя повторяет форму пчелиных сот (отсюда – «сотовый»).

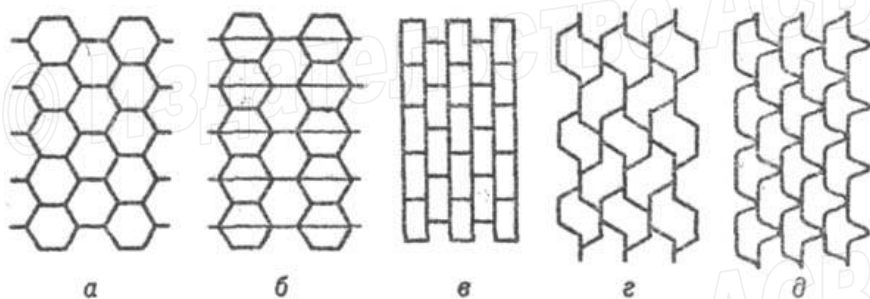


Рис. 1.2. Формы ячеек сотового наполнителя:

а – шестигранная; б – шестигранная усиленная; в – прямоугольная; г – шестигранная смещенная; д – гибкая (флексорная)

Назначение сотового наполнителя из ПКМ обеспечивать совместную работу и устойчивость несущих слоев, а также сохранять заданное расстояние между ними. Совместная работа слоев обеспечивается за счет их соединения с наполнителем и передачи последним усилий с одного слоя на другой; устойчивость слоев обеспечивается, так как наполнитель создает для них практически непрерывную опору; необходимое расстояние между слоями сохраняется за счет достаточной жесткости наполнителя.

Основными параметрами, определяющими технологические и эксплуатационные характеристики сотового наполнителя, являются формы и размеры ячеек.

Число комбинаций форм и размеров ячеек сотового наполнителя может быть неограниченным.

На рис. 1.2 представлены основные виды форм ячеек сотового наполнителя. Наиболее распространена шестигранная форма (рис. 1.2, а).

На практике форма ячейки выбирается прежде всего с целью технологичности, что связано с геометрией слоистой конструкции с сотовым наполнителем – плоской, одинарной или двойной кривизны. При этом следует иметь в виду, что форма ячеек при прочих равных условиях влияет в определенной степени и на прочностные характеристики материала.

Геометрические размеры структурных элементов сотового наполнителя (размер грани и толщина стенок) выбираются из соображений прочности сотовой конструкции.

С точки зрения унификации желательно использовать сотовые наполнители, способные выкладываться без искажения формы ячеек и их разрушения по поверхностям любой кривизны – от плоской до двойной.

Однако форма таких ячеек достаточно сложная, что приводит к серьезным технологическим затруднениям при их изготовлении и необходимости создания уникального оборудования.

В связи с этим разработаны два типа сот: для плоских конструкций, конструкций одинарной и двойной кривизны.

Классическим представителем первого типа сот являются соты с шестигранной формой ячеек, показанные на рисунке 1.3 [1]. В связи с достаточно простой технологией их изготовления и большой номенклатурой конструкций плоской формы или небольшой одинарной кривизны эти соты получили наиболее широкое распространение.

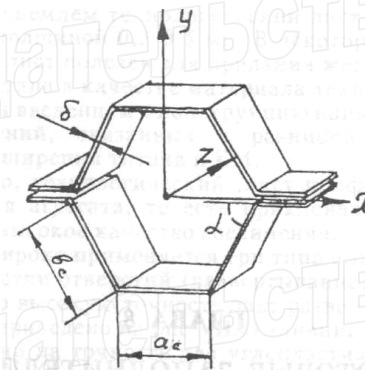


Рис. 1.3. Шестигранная ячейка сотового наполнителя:

a_c – длина двояной стенки ячейки; b_c – длина одинарной стенки; δ – толщина одинарной стенки; α – угол изгиба листа в ячейке

Основной недостаток вышеуказанных сот – неспособность выкладываться на поверхностях сложной геометрии, в ряде случаев может быть преодолен изготовлением детали заданных размеров и конфигурации из сотового блока, например, фрезерованием. Однако

это приводит к существенному усложнению технологии изготовления сотовых конструкций, повышению ее трудоемкости и некоторому снижению прочности.

Соты с шестигранными ячейками с усиливающим элементом, показанные на рис. 1.2, (б), являются наиболее жесткими.

Ко второму типу сотовых заполнителей относятся соты с прямоугольной формой ячеек (рис. 1.2, в). Заполнитель с прямоугольной формой ячеек не требует приложения усилий при выкладке на цилиндрической поверхности, т. е. поверхности одинарной кривизны.

Плотность такого сотового заполнителя в 1,3 раза больше плотности заполнителя с ячейками правильной шестигранной формы; прочность при сдвиге в направлении X в 1,5 раза меньше, а в направлении Y в 1,5 раза больше соответственно.

Как уже отмечалось выше, размеры ячеек (длина сторон и толщина стенки) при выбранной форме ячейки определяются требованиями к прочности сотовой конструкции. Чем меньше длина стороны ячейки, тем больше плотность и, следовательно, прочность сотового заполнителя.

Сотовый заполнитель с повышенными характеристиками по прочности и плотности используется в конструкциях силового назначения.

Главными функциями несущих облицовочных материалов для сотовых конструкций из ПКМ являются обеспечение их жесткости относительно изгиба и сдвига в плоскости пластин, а также передача нагрузок в той же плоскости.

В сотовых строительных конструкциях из ПКМ для изготовления несущих пластин используются стекловолокнистые препреги и препреги на основе углеродных волокон (тканей или однонаправленных материалов).

Обшивки из полимерных композиционных материалов получают либо предварительно в виде заготовок с не полностью отвержденным связующим, либо путем выкладки или намотки при сборке и склеивании.

Применяемые конструкции с сотовым заполнителем по их геометрии (форме) можно классифицировать следующим образом:

- панели с постоянной высотой сотового заполнителя, куда входят панели агрегатов плоские, одинарной и двойной кривизны с различными формами в плане, в том числе сотовые обшивки;

- панели с переменной высотой сотового заполнителя и сотовые заполнители со сложными искривленными контурами.

В зависимости от конструктивных решений сотовые панели можно подразделять на панели с замкнутыми и незамкнутыми каркасами, а также без каркаса. В последних крепление выполняется благодаря местным усилиям в сотовом заполнителе.

В зависимости от применяемого материала конструкции с сотовым заполнителем можно классифицировать следующим образом:

- конструкции из алюминиевых сплавов;
- конструкции из ПКМ;
- комбинированные конструкции с применением углепластика.

Шумопоглощающие конструкции предназначены для снижения уровня шума в окружающей среде. Для этого используется многослойная панель с сотовым заполнителем, которая является несущей и служит низкочастотным шумопоглощающим устройством. Конструкция состоит из трех листов и двух пакетов сотового заполнителя разной высоты. Данная конструкция приведена на рис. 1.4:

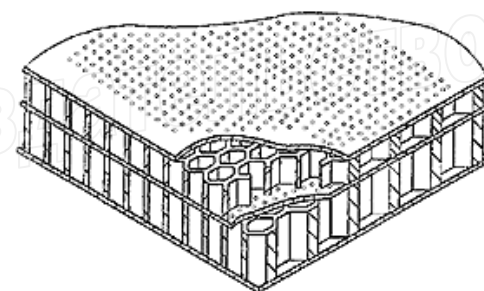


Рис. 1.4. Шумопоглощающая конструкция

Расстояние между листами подбирается в соответствии с конструктивными параметрами панели и необходимой степенью шумопоглощения.

Некоторые многослойные шумопоглощающие конструкции в процессе эксплуатации находятся в сложных условиях нагружения и испытывают высокие акустические нагрузки, климатическое воздействие. К ним предъявляются высокие требования по прочности и гладкости поверхности. Многослойные шумопоглощающие конструкции создают условия комфорта, выполняя одновременно функции элементов, повышающих жесткость и прочность.

Общими требованиями, предъявляемыми к этим конструкциям, являются: высокое качество внешней поверхности, минимальная масса и минимальные затраты труда на их изготовление.

Отличительными особенностями шумопоглощающих конструкций являются марки применяемого для их изготовления материала, а также наличие пористого материала в сотовой ячейке.

Сотовые конструкции для элементов интерьера можно разделить на следующие группы (рис. 1.5) [1]:

- трёхслойные сотовые силовые панели, к которым относятся декоративные панели ограждений (рис. 1.5, а);

– трёхслойные сотовые несилловые панели различных обшивок, а также панели интерьера, выполненные в шумопоглощающем варианте (рис. 1.5, б);

– трёхслойные панели двойной кривизны (рис. 1.6, в) и панели сложных форм.

Конструкции с сотовым заполнителем применяют как силовые элементы, способные воспринимать местные и силовые нагрузки, и как несилловые элементы, способные воспринимать лишь небольшие нагрузки.

В большинстве случаев кроме своей основной функции – образовывать корпусную конструкцию – конструкции с сотовым заполнителем выполняют и ряд других, например, придают свойства тепловой и звуковой изоляции.

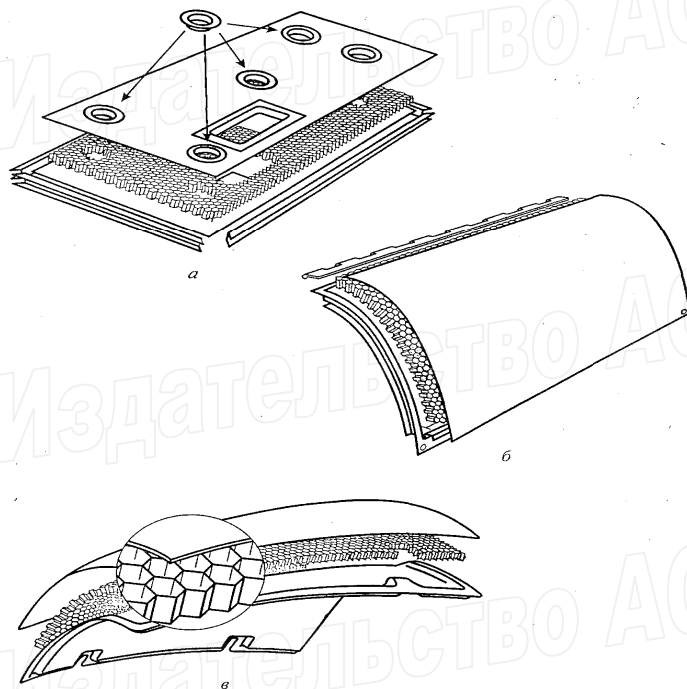


Рис. 1.5. Типовые панели с сотовым заполнителем:

а – плоская панель; б – панель одинарной кривизны; в – панель двойной кривизны

Существенное влияние на прочность сотовых конструкций из ПКМ оказывает конструктивное выполнение заделок торцов.

На рис. 1.6 приведены отдельные варианты заделок торцов сотовых конструкций из ПКМ.

Торцы панелей сотовых конструкций заделывают несколькими слоями стеклоткани (рис. 1.6, а), дополнительными накладками (рис. 1.6, б), вкладышами (рис. 1.6, в) и комбинированным способом (рис. 1.6, г).

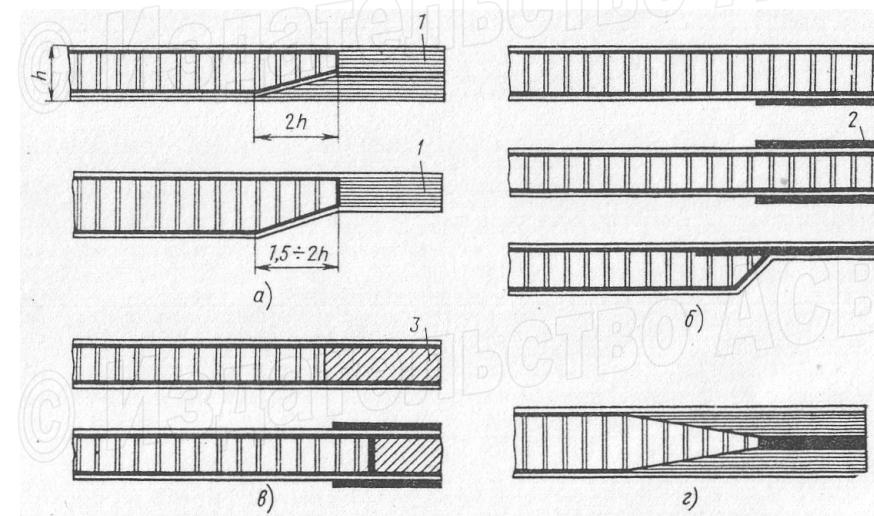


Рис. 1.6. Схема заделок кромок панелей:

1 – стеклоткань, пропитанная связующим; 2 – накладки; 3 – жесткий вкладыш.

Сотовые конструкции должны также удовлетворять требованиям по ресурсу.

Если физико-механические свойства отвержденных клеевых прослоек и связующих со временем ухудшаются вследствие процесса старения, то в этом случае ресурс изделия ограничивают годами хранения и эксплуатации. Предварительный ресурс конструкций устанавливают на основании испытаний по специальной программе образцов. В процессе эксплуатации фактический ресурс уточняется.

Техническими условиями устанавливается также допустимая величина зазора между склеиваемыми поверхностями, определяемая в основном свойствами клеевой композиции. Надлежащие зазоры в соединениях уменьшают вероятность появления непрочных и способствуют получению наибольшей прочности для выбранной марки клея.

Обычно зазор между склеиваемыми поверхностями деталей сотовой конструкции из ПКМ не превышает 0,2 мм.

Материал деталей, точность воспроизведения геометрических размеров и формы, масса, качество поверхности и другие параметры должны удовлетворять требованиям чертежей и технических условий.

2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ

2.1. Материалы обшивок для сотовых конструкций из ПКМ

В табл. 2.1 приведены материалы и их механические свойства, применяемые для изготовления обшивок сотовых конструкций из ПКМ [2].

Таблица 2.1

Механические свойства материалов обшивок для сотовых конструкций из ПКМ

Материал	Предел текучести, МПа	E , ГПа	λ_{δ} ($1-\nu^2$)	Масса 1 м^2 $b = 1 \text{ мм}$, кг	Примечание
Углепластик:					
– ткань	1280	160	0,99	1,54	Высокая прочность
– однонаправленный	3500	320	0,99	1,54	Высокая прочность
Стеклопластик:					
– мат/ПЭ*	224	14,7	0,98	1,35	Нет данных
– ткань из ровинга/ПЭ*	608	29,6	0,98	1,35	Нет данных
Стеклопластик на основе смол:					
– эпоксидной	1009	56	0,98	1,83	Низкая температура отверждения
– фенольной	769	56	0,98	1,61	Высокая теплостойкость
– полиэфирной	769	56	0,98	1,92	Низкая теплостойкость
– полиамидной	961	56	0,98	1,83	Высокая теплостойкость

*ПЭ – полиэфирное связующее; b – толщина

В строительстве при изготовлении несущих пластин для сотовых конструкций из ПКМ применяют стекловолокнистые препреги, препреги на основе углеродных волокон.

Стекловолокнистые препреги используют для панелей плоских и одинарной кривизны, препреги на основе углеродных волокон – для панелей плоских, одинарной и двойной кривизны.

Препреги – это полуфабрикаты ПКМ, представляющие собой организованную определенным образом систему волокнистых наполнителей, совмещенных с полимерными связующими.

Препреги достаточно эластичны и имеют жизнеспособность до четырех месяцев при хранении в холодильнике. Они одновременно выполняют функции клеевой пленки, не требуя нанесения дополнительного слоя клея при соединении с сотовым наполнителем.

Применение препрегов увеличивает цикл и трудоемкость технологического процесса производства, однако они способствуют повышению качества, совершенствованию весовых характеристик деталей.

Выбор типа связующего, природы и структурной организации волокнистого наполнителя в препреге определяется условиями эксплуатации и требованиями, предъявляемые к формуемой детали.

2.2. Материалы для изготовления сотовых наполнителей из ПКМ

Среди материалов, наиболее часто используемых для изготовления сотового наполнителя из ПКМ в авиационной промышленности, применяются материалы на основе полимерной бумаги и на основе стеклотканей.

2.2.1. Сотовый наполнитель на основе полимерной бумаги

В современном строительстве при производстве сотовых наполнителей из ПКМ бумаги широко используются благодаря своим преимуществам перед разными материалами.

В промышленном масштабе для изготовления сотовых наполнителей выпускают арамидные синтетические бумаги: Nomex (фирма «Дюпон», США), PAI-M на основе волокна Copex (фирма Teijin, Япония) и БФСК на основе волокна Фенилон (Россия).

Арамидные бумаги, предназначенные для производства сотовых наполнителей (рис. 2.1), изготавливаются из короткорезаного волокна длиной 2–12 мм и волокнисто-пленочного полимерного связующего (ВПС).

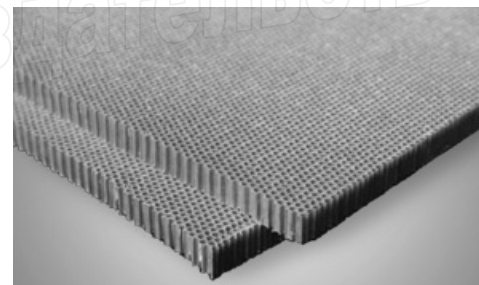


Рис. 2.1. Сотовый наполнитель на основе арамидной бумаги

В табл. 2.2 приведены характеристики полиамидных бумаг [2].

Таблица 2.2

Характеристики полиамидных бумаг

Показатель	Nomex	Conex	БФСК
– волокна	Полиметафениленизофталамид (ПМФИФА)		
– связующего	ПМФИФА	Полиамидоимид с миканитом	ПМФИФА
Массовая доля, %			
– волокна	35–40	Нет данных	50
– связующего	55–60	Нет данных	50
Свойства волокна:			
– линейная плотность, текс	0,22	0,055-0,333	0,22
– плотность, г/см ³	1,38	1,38	1,38
– удельная разрывная нагрузка, сН/текс	40-50	41,4	Не менее 36,3
– удлинение, %	40-50	34,0	Не менее 35,0
– модуль упругости при растяжении, МПа	7000–8000	8700	7000–9000

Преимущества полимерных бумаг перед металлами в том, что они легче, не корродируют в контакте с водой; перед керамикой – хорошие демпфирующие свойства при воздействии ударных нагрузок (ударная вязкость); перед стеклотканями в более высокий ресурс работы и прочностные характеристики в составе сотовых конструкций, возможность изготовления заполнителей с ячейками малых размеров. Кроме того, важными свойствами полимерных бумаг как структурных элементов сотовых заполнителей являются относительно высокие прочность и жесткость, устойчивость к многократным изгибам, негорючесть, грибоустойчивость, термостойкость, радиопрозрачность, химическая стойкость.

Наилучшие бумагообразующие свойства имеют органические волокна, способные образовывать эффективные межмолекулярные водородные связи. С этой точки зрения ароматические полиамиды (арамиды) являются перспективным сырьем для создания бумаг технического назначения.

Сама арамидная бумага относительно негорючая и при испытаниях на горючесть панелей выделяет мало дыма и газов.

Механические свойства арамидных бумаг в структуре заполнителя, ниже, чем у алюминия (особенно модуль упругости), однако они обладают уникальной способностью сохранять эксплуатационные качества при перегрузках и локальных областях без необратимых повреждений.

Такие свойства привели к широкому использованию материалов на основе бумаг для облегченных конструкций интерьеров самолетов: панелей облицовки или полов. Преимущества, которые дает этот материал, делают его конкурентоспособным, несмотря на высокую стоимость.

Основные свойства арамидных бумаг, предназначенных для производства сотовых заполнителей отечественного производства, приведены в табл. 2.3 [1]:

Таблица 2.3

Физико-механические свойства бумаг БФСК

Показатель	Марка бумаги			
	БФСК-50	БФСК-75	БФСК-100	БФСК-130
Толщина, мкм	60±10	80±10	105±10	145±15
Масса бумаги площадью 1м ² , г	48±4	65±5	96±8	125±10
Плотность, кг/м ³	800–880	810	915	860
Разрушающее усилие, Н, в направлениях:				
– машинном	30	69	88	153
– поперечном	20	23	39	71
Относительное удлинение, %, не менее, в направлениях:				
– машинном	5,0	6,0	6,5	8,0
– поперечном	4,0	4,5	5,5	6,0
Сопротивление излому в среднем в обоих направлениях	4500	4000	4000	4000

На основе арамидных бумаг и фенольно-формальдегидной смолы изготавливают сотовые заполнители, предназначенные для работы в диапазоне температур от –60 до +80 °С. Номенклатура этих сотовых заполнителей, их назначение и механические свойства приведены в табл. 2.4 [1]:

Обеспечение упругих и прочностных свойств сотового заполнителя достигается применением пропитывающих составов на основе спирторастворимых фенолформальдегидных смол.

Поскольку арамидная бумага отличается гладкой поверхностью и высокой химической стойкостью к органическим растворителям, то она имеет плохую адгезию к связующим фенольного типа, что затрудняет получение на ее основе сотовых заполнителей с высокими прочностными свойствами. В связи с этим необходима предварительная обработка поверхности арамидной бумаги, в результате которой достигаются одновременно две цели:

– разрыхление поверхностного слоя бумаги с помощью активного растворителя;

– введение в поверхность бумаги химических групп, способных к взаимодействию с концевыми группами молекул связующего.

Таблица 2.4

Механические свойства полимерных сотовых наполнителей и области их применения

Марка полимерсотопласта	Плотность, кг/м ³	Размер грани ячеек, мм	Предел прочности при сжатии, МПа	Е, МПа	Предел прочности при сдвиге в направлении X, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа
1	2	3	4	5	6	7
Сотовые панели интерьера (малонагруженные, плоские)						
ПСП-1-4,2-25	25±5	4,2	0,3	24,6	0,4	1,4
ПСП-1-8-25	25±5	8,0	0,3	–	–	–
ПСП-1-3,5-35	35±5	3,5	0,5	31,2	0,6	1,8
ПСП-1-8-35	35±5	8,0	0,5	–	–	–
ПСП-1-2,5-45	45±5	2,5	1,1	41,5	0,8	2,5
ПСП-1-2,5-60	60±5	2,5	1,4	–	1,1	3,0
Средненагруженные плоские конструкции						
ПСП-1-1,8-60	60±5	1,8	1,5	–	1,10	3,5
ПСП-1-2,0-85	85±5	2,1	3,0	110,5	2,0	5,7
ПСП-1-2,5-100	100±5	2,5	4,5	139,4	2,20	7,0
Средненагруженные конструкции с одинарной кривизной						
ПСП-1-2,5П-65 (100)	65±5	2,5×9,0	1,6	–	–	–

В качестве аппретирующего состава используют полиамидную смолу, содержащую амидные группы.

Обработка таким аппретом в 5–6 раз повышает предел прочности при разделении двух листов бумаги, склеенных связующим, т.е. повышает адгезию связующего к бумаге.

Аппретирование арамидной бумаги осуществляют в пропиточной машине протяжкой бумаги через ванну с составом на основе спирторастворимых полиамидов с добавлением активного растворителя и последующей сушкой в сушильной камере пропиточной машины по ступенчатому режиму нагрева за счёт подъёма температуры при переходе из одной зоны камеры в другую. Для визуального контроля равномерности нанесения тонкого слоя аппрета в его раствор вводят небольшое количество контрастного органического растворителя.

Основное назначение пропитки бумаги – это повышение модуля упругости, т.е. жесткости, сотового наполнителя при сжатии, сдвиге и растяжении.

В производстве сотовых материалов наиболее широко применяются пропитывающие составы (связующие) на основе фенолформальдегидной смолы.

Фенолформальдегидная смола обеспечивает необходимые упругие и прочностные характеристики сотового наполнителя.

Недостатком смол является горючесть, что недопустимо с точки зрения безопасности при эксплуатации.

В качестве примера рассмотрим свойства фенолформальдегидного связующего марки БФОС.

Это связующее предназначено для производства полимерсотопластов – легких ячеистых материалов, используемых для изготовления панелей интерьера.

Сотопласты, изготовленные с применением связующего БФОС, имеют:

- прочность на сжатие при температуре 20 °С 2–45 кгс/см² в зависимости от марки сотопласта;
- разрушающее напряжение при сдвиге не менее 1,1–1,2 кгс/см².

Для получения связующих с пониженной горючестью применяется метод введения в полимеры ингибиторов (замедлителей) горения, или ретардантов.

Ретарданты являются продуктами, содержащими, как правило, такие элементы, как фосфор, азот, галоиды.

Вариантом фенолформальдегидного связующего является связующее на основе меламинаформальдегидной смолы, модифицированной эпоксидной смолой, которое содержит в качестве растворителя воду.

Для снижения трещинообразования это связующее модифицировано каучуком. Спиртовые растворы смол обладают горючестью и взрывоопасностью. Для понижения горючести отверждённых фенолформальдегидных смол в их состав вводят фосфаты, галоиды, например, эфиры алкилфосфоновой кислоты. Эфир алкилфосфоновой кислоты через свои функциональные гидроксильные группы вступает во взаимодействие с метильными группами фенолформальдегидной смолы, образуя с ними химическую связь. Поэтому эти ингибиторы окисления (называемые ретардантами) оказываются химически связанными со связующим, что предотвращает их удаление со временем эксплуатации и тем самым снижает огнестойкость.

Преимущества водорастворимых связующих очевидны с точки зрения пожарной опасности, взрывобезопасности и экологии.

При изготовлении сотового заполнителя из полимерной бумаги, применяемые клеи должны обеспечивать требуемую прочность соединений ячеек в условиях эксплуатации в пределах установленного ресурса, а также в процессе изготовления заполнителя. Усилия растяжения пакетов достаточно велики, они возрастают с уменьшением размера ячеек, увеличением толщины бумаги и увеличением габаритов растягиваемого пакета.

Клей должен обеспечивать получение тонких клеевых полос (5–8 мкм). Это важно, так как при склеивании пакетов под давлением меньше изменяется ширина неотверждённой клеевой полосы и, следовательно, искажается форма ячеек в заполнителе, уменьшается время сушки и полимеризации и соответственно увеличивается производительность на операциях нанесения клеевых полос и отверждения их, меньше масса сотового заполнителя.

2.2.2. Сотовые заполнители на основе стеклотканей

Стеклоткани для изготовления сотовых заполнителей должны иметь небольшие массовые характеристики, плотную структуру, минимальные отклонения прочности, отсутствие деформации структуры при ее переработке на валковом оборудовании. Применяемые стеклоткани изготавливаются на основе алюмоборосиликатного стекла с активными замасливателями.

В качестве полимерной матрицы используются растворы полимерных связующих на основе фенолформальдегидных, полиамидных, эпоксидных, фенолоэпоксидных и других смол.

В табл. 2.5 приведены физико-механические характеристики стеклотканей [1].

Таблица 2.5

Физико-механические характеристики стеклотканей

Марка ткани	Ширина, мм	Толщина, мм	Масса, 1 м ² , г	Плотность, нить/см		Разрывная нагрузка, кгс	
				по основе	по утку	по основе	по утку
ЭЗ-100	700–1070	0,1	108±10	20±1	20±1	60	60
Т-24	700–900	0,105	80±8	22±1	20±1	>25	>25

Сотовые конструкции на основе стеклотканей широко используются, когда необходимо создать материалы со специальными электрофизическими свойствами или когда к изделию предъявляются требования теплостойкости и низкой теплопроводности.

В строительстве стеклопластиковые соты применяются в основном в наружных конструкциях, а также в звукопоглощающих панелях.

В таблице 2.6 приведены физико-механические характеристики стеклосотового заполнителя [1]:

Таблица 2.6

Физико-механические характеристики стеклосотового заполнителя

Марка	Размер ячейки, мм	Объемная масса, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при сдвиге, МПа	Содержание связующего, %
ССП-1	2,5	100-110	3,5	1,8	35–45
	3,5	80-95	3,0	1,5	
	4,2	65-75	1,8	1,2	
	5,0	50-65	1,5	0,8	
ССП-1П	2,5	80-90	2,5	1,5	35–45
	3,5	70-80	3,5	1,3	
	4,2	55-65	1,5	1,1	
ССПТ	2,5	100-110	2,4	1,5	40–55
	3,5	80-95	1,8	1,1	
	4,2	70-80	1,1	0,9	
	5,0	55-65	0,9	0,7	
ССП-1×45	4,1	60-70	2,0	1,6	35–40
	4,6	45-55	1,6	1,2	
	5,0	35-45	0,9	0,7	

2.3. Клеи для склеивания сотовых конструкций

Для склеивания сотового заполнителя с облицовочными листами и каркасной конструкцией используются различные типы клеев. В процессе полимеризации клея на границе облицовочного листа и сотового заполнителя возникают различные химические и физические процессы, которые значительно влияют на качество узла или агрегата в ходе сборки, их размеры и прочностные свойства.

Ниже перечислены основные типы клеев, используемых для склеивания сотовых конструкций из ПКМ:

1. Пленочные на основе эпоксидных смол, защищенные с двух сторон антиадгезионными прокладками (полиэтиленовой пленкой и ламинированной бумагой) – ВК-31, ВК-36, ВК-36А, ВК-36РД.

Характеристики:

- рабочие температуры – 60...+150 °С;
- предел прочности клеевых соединений при сдвиге, МПа, при температуре 20 °С не менее 29,0–35,0;
- при температуре 80 °С 18,0–25,0;
- при температуре 150 °С 18,0–25,0;
- предел прочности клеевых соединений при отрыве, МПа, при температуре 20 °С 7,0;
- при температуре 80 °С 3,5;
- при температуре 150 °С 2,5.

Режимы отверждения:

- температура 125–175 °С;
- удельное давление 0,05–0,1 МПа;
- время 1,5–4 ч.

2) пленочные на основе эпоксидных смол, защищенные с двух сторон прокладками (бумагой с антиадгезионным слоем и полиэтиленовой пленкой) ВК-41, ВК-51.

Характеристики:

- рабочие температуры –60 до +80 °С;
- предел прочности клеевых соединений при сдвиге, МПа; при температуре 20 °С не менее 28,0–36,0;
- при температуре 80 °С 19,6–27,4;
- предел прочности клеевых соединений при отрыве, МПа; при температуре 20 °С 6,86;
- при температуре 80 °С 4,5–5,5.

Режимы отверждения:

- температура 125±5 °С;
- удельное давление 0,06–0,173 МПа;
- время 3 час.

3) вспенивающиеся клеи на основе эпоксидных смол, защищенные с двух сторон антиадгезионными прокладками (бумагой с антиадгезионным слоем и полиэтиленовой пленкой) ВКВ-3.

Характеристики:

- рабочие температуры – 60 – +150 °С;
- предел прочности клеевых соединений при отрыве; при температуре 150 °С 2,5 МПа;
- коэффициент вспенивания 1,75 -3,5;
- толщина пленки 0,8±0,2 мм.

Режимы отверждения:

- температура 125±5 °С;
- удельное давление 0,05 МПа;
- время 3 ч.

3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ

Выбор технологического процесса изготовления сотовых конструкций увязывают с их геометрическими параметрами, материалом обшивки и сотового заполнителя, с видом сотового заполнителя в состоянии поставки, с формой и размером ячеек, с конструкцией заделок кромок и мест передачи сосредоточенных нагрузок, а также с технологическими свойствами клея.

В общем виде, вне зависимости от перечисленных факторов, технологический процесс изготовления любой сотовой конструкции включает следующие этапы:

1. Входной контроль материалов;
2. Изготовление обшивок;
3. Изготовление и подготовка сотового заполнителя;
4. Предварительная сборка и разборка сотовых конструкций;
5. Подготовка под склеивание обшивок и сотового заполнителя;
6. Нанесение клея на поверхности обшивок (прикатка клеевой пленки);
7. Сборка и склеивание;
8. Контроль качества сотовых конструкций.

Входной контроль – это этап технологического процесса, на котором материалы и полуфабрикаты, применяемые при изготовлении сотовых конструкций, должны быть проверены по показателям качества.

В производство должны допускаться материалы и полуфабрикаты, прошедшие входной контроль. Условия хранения материалов и полуфабрикатов должны соответствовать техническим условиям.

Материалы и полуфабрикаты, применяемые при изготовлении сотовых конструкций, в том числе материалы, покрытия и вспомогательные материалы, связанные с технологией изготовления, должны соответствовать требованиям государственных и отраслевых стандартов, техническим условиям и иметь сертификат или другие документы, подтверждающие качество изготовления.

Придание плоскому сотовому заполнителю необходимой формы заключается в том, что для изготовления сотового заполнителя одинарной или двойной кривизны его предварительно размягчают путем нагрева, а затем деформируют на прессе. При этом лучше поддаются необратимому формоизменению заполнители, имеющие ячейки прямоугольной формы.

Для изготовления сотового заполнителя переменной высоты применяют механическую обработку.

Ниже рассмотрены основные этапы технологического процесса изготовления сотовых конструкций.

3.1. Технология изготовления обшивок

Обшивки из ПКМ получают либо предварительно в виде заготовок с не полностью отвержденным связующим, либо путем выкладки или намотки при сборке и склеивании агрегатов.

В качестве обшивок применяют также препреги. Из препрегов вручную или механизированными способами (выкладкой, намоткой) собирают заготовки (пакеты) с заданной конструктором схемой ориентации волокнистого наполнителя, имеющие близкую к будущей детали конфигурацию, которые затем формуют прессованием, вакуумным, пневматическим, автоклавным, термокомпрессионным методами или пултрузией.

Применение препрегов увеличивает цикл и трудоемкость технологического процесса производства, однако они способствуют повышению качества, совершенствованию весовых характеристик деталей.

Технологический процесс производства препрегов включает в себя операции приготовления связующего, подготовки волокнистого наполнителя и совмещения их пропиткой, смешением, послойной сборкой или текстильными способами (плетением, ткачеством и т.п.).

Совмещение компонентов полуфабрикатов ПКМ осуществляют по жидкофазному (мокрому) и твердофазному (сухому) способам.

При жидкофазном совмещении связующее, имеющее консистенцию вязкой жидкости, смачивает поверхность волокнистого наполнителя и заполняет межволоконное пространство.

Твердофазное совмещение предполагает равномерное распределение по объему волокнистого наполнителя твердых частиц связующего.

В свою очередь, жидкофазный способ получения препрегов (пропитку) подразделяют на пропитку без давления и пропитку под давлением.

В процессе пропитки без давления связующее смачивает поверхность наполнителя и проникает в межволоконное пространство под действием сил поверхностного натяжения и силы тяжести, а силы вязкого трения сопротивляются движению связующего.

Пропитку без давления осуществляют окунанием, контактным способом или напылением.

К способам пропитки под давлением относят вакуумную, пневматическую и вакуум-пневматическую пропитку, центробежную и экструзионную пропитку, пропитку с наложением вибрации и пропитку смешением.

Для твердофазного совмещения применяют полимерные связующие в виде порошка, пленок или волокон.

Порошкообразные полимерные связующие совмещают с волокнистыми наполнителями смешением или напылением, пленочные – путем послойного чередования пленки связующего и листового волокнистого наполнителя (ткани, бумаги и др.) в процессе сборки пакета (заготовки) ПКМ перед формованием изделия.

Волокнистые связующие сочетают с волокнами наполнителя методами ткачества или плетения.

Для производства препрегов на основе стеклянных, углеродных и органических наполнителей служит специальное оборудование, представляющее собой технологические линии размотки исходного материала, его пропитки, сушки и смотки на приемные катушки.

3.2. Технология изготовления сотового заполнителя

3.2.1. Изготовление сотовых заполнителей на основе полимерных бумаг

При изготовлении сотового заполнителя на основе полимерных бумаг используют два основных метода:

- 1) изготовление сотовых заполнителей методом профилирования;
- 2) изготовление сотовых заполнителей методом растяжения.

Метод профилирования применяется при изготовлении сотовых заполнителей из пропитанных и непропитанных тонких бумаг.

Последовательность операций изображена на рис. 3.1 [3].

Основные этапы техпроцесса:

- профилирование материала (рис.3.1, а);
- нанесение клея на склеиваемые поверхности и сушка (рис. 3.1,б);
- сборка блока, запрессовка и склеивание в печи (рис.3.1,в);
- обработка заполнителя для получения нужной формы (рис. 3.1, г).

Основные этапы метода растяжения изображены на рис. 3.2 [3].

К ним относятся:

- нанесение клеевых полос на тонколистовой материал (рис. 3.2, а);
- сборка пакета из листов, при этом клеевые полосы в сечении пакета располагаются в шахматном порядке (рис. 3.2, б);
- склеивание пакета (рис. 3.2, в);

- раскрой пакета на заготовки (рис. 3.2, г);
- растяжение пакета (рис. 3.2, д).

Если пакет склеивается из непропитанных слоев, то растянутый сотоблок опускается в емкость со связующим с последующей сушкой. Данный способ изготовления шестигранных сот является наиболее распространенным, так как обеспечивает высокую производительность при практически полной автоматизации процесса.

При изготовлении сотовых заполнителей растяжением пакетов контролируются следующие параметры:

- качество материала (бумага, клей, связующее);
- геометрические параметры нанесенных клеевых полос (ширина и толщина полос, расстояние между ними);
- режимы склеивания пакетов (температура, давление и время выдержки);
- качество пропитки и сушки (расход связующего, температура сушки и время выдержки);
- прочность склеивания ячеек при расслаивании;
- форма ячеек и геометрические размеры заполнителя.

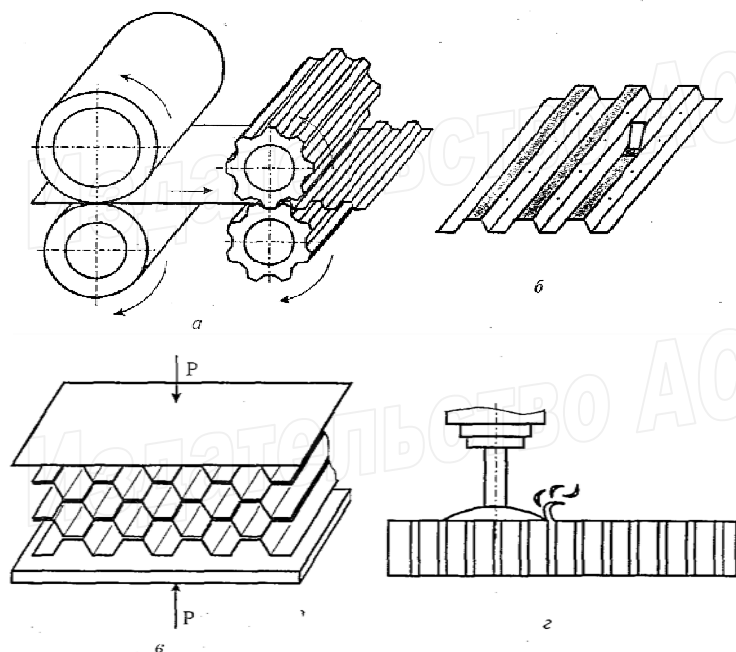


Рис. 3.1. Сборка сот из профилированных листов:
а – профилирование листа; б – нанесение клея; в – склеивание гофрированных листов; г – фрезерование поверхности сотоблока

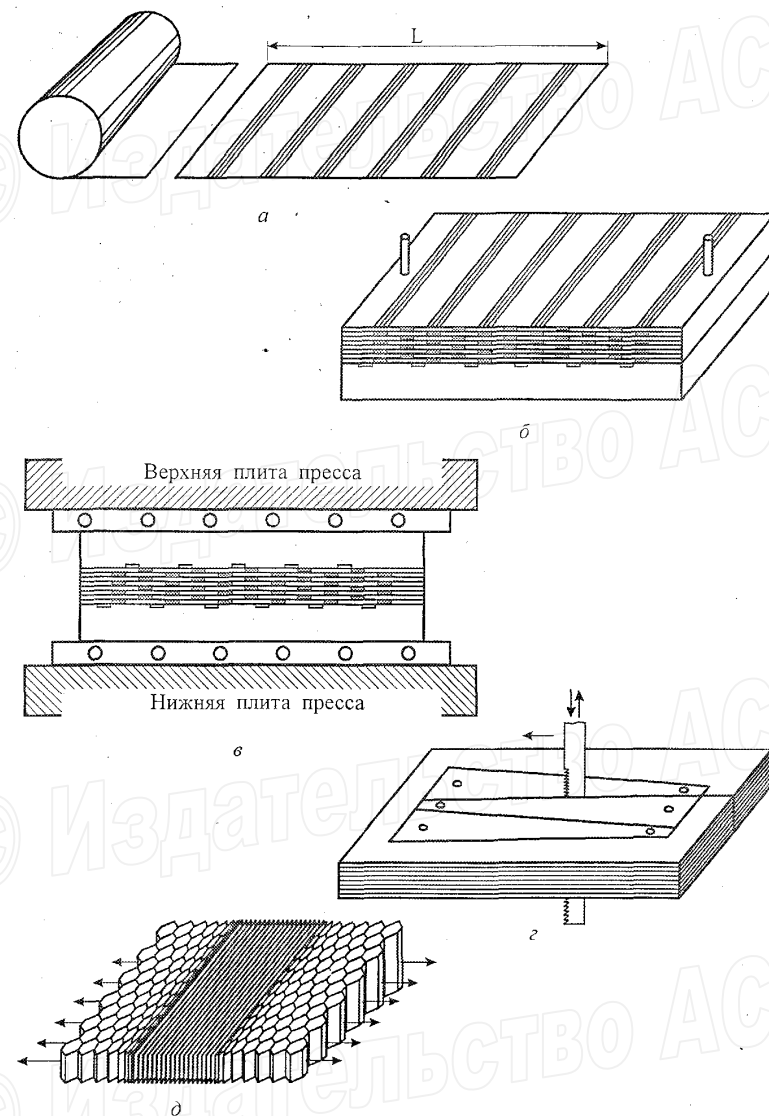


Рис. 3.2. Изготовление сот растяжением пакета

3.2.2. Изготовление сотовых заполнителей на основе стеклоткани

Изготовление сотового заполнителя из стеклотканей можно осуществлять методами профилирования, блочно-тепловой сварки, растяжения сотопакетов и методом объемного ткачества. Наиболь-

шее распространение получили два последних как наиболее производительные и механизированные. Учитывая этот факт, рассмотрим методы растяжения и объемного ткачества.

Сотовые наполнители, полученные методом растяжения пакетов, отличаются более высокой прочностью. Этот метод позволяет механизировать выполнение всех операций процесса, что очень важно для обеспечения стабильного качества и снижения трудоемкости.

Технология изготовления сотовых наполнителей на основе стеклотканей методом растяжения в основном аналогична технологии изготовления сотового наполнителя из полимерной бумаги и позволяет использовать одно и то же оборудование. Отличие заключается в изменении технологических режимов, связанных со спецификой применяемых материалов.

Технологический процесс изготовления сотовых наполнителей включает следующие операции:

- 1) нанесение клеевых полос;
- 2) раскрой стеклоткани на заготовки;
- 3) пропитка сотового блока в связующем;
- 4) отверждение сотового блока;
- 5) резка сотового блока на панели.

Длина и ширина пакетов сотовых наполнителей зависят в основном от ширины ткани и применяемого оборудования. Толщина пакетов устанавливается с учетом потребной длины сотового наполнителя после растяжения.

На рис. 3.3 изображена типовая схема установки для нанесения клеевых полос на ткань.

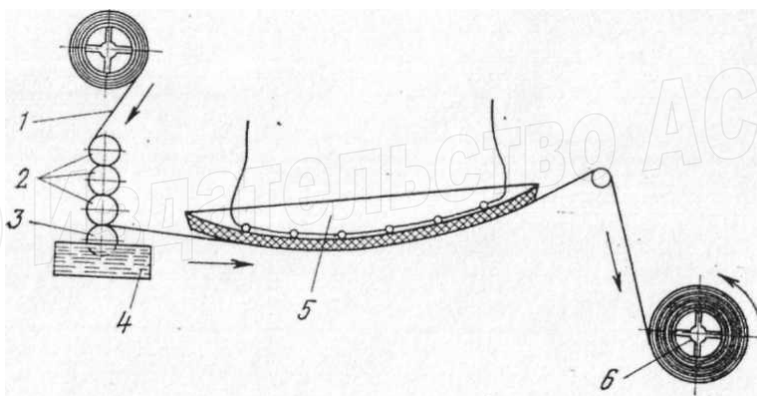


Рис. 3.3. Схема установки для нанесения клеевых полос на ткань и сушки: 1 – ткань; 2 – промежуточные ролики; 3 – клеенаносящий ролик; 4 – ванночка с клеем; 5 – сушильное устройство; 6 – барабан

Стеклоткань из рулона 1, закрепленного в верхней части установки, пропускают через систему роликов 2, служащих для разглаживания материала и придания ему направления, и через клеенаносящий ролик 3, расположенный в ванне с клеем 4. Клеенаносящий ролик имеет кольцевые выступы, расстояние между которыми равно шагу клеевых полос. С помощью выступов на ролике клей непрерывно наносится на одну сторону движущейся ткани, которая затем проходит через сушильное устройство 5 и наматывается на барабан 6.

Сушильное устройство выполнено в виде электронагревателя длиной 1,5 м. Ткань при движении соприкасается с поверхностью электронагревателя стороной, где клеевые полосы не нанесены. Такой способ подсушки позволяет удалять растворитель, в первую очередь из слоев клея, непосредственно примыкающих к ткани, а затем последовательно из остальных слоев. Следует отметить, что вероятность образования корочки на поверхности клеевых полос, нанесенных на стеклоткань, вообще невелика, так как даже при другом способе подсушки растворитель может уходить через стеклоткань.

Ткань, зажата между клеенаносящим и направляющим роликами, протягивается через механизмы установки при вращении клеенаносящего ролика, соединенного цепной передачей с редуктором электромотора. Принудительное вращение сообщается также барабану цепной передачей от электропривода.

Барабан с намотанной на него тканью снимают с установки и закрепляют на столе. Сматываемую с барабана ткань нарезают на мерные длины ножницами, а листы ткани укладывают на столе стопкой клеевыми полосами вниз, причем смежные листы сдвигают друг относительно друга на полшага клеевых полос. Правильное взаимное положение клеевых полос устанавливают визуально. Каждый укладываемый лист проглаживают устройством для разглаживания. Этим фиксируют положение листа и устраняют складки и неровности. Собранный пакет склеивают на прессе между обогреваемыми шлифованными плитами.

При изготовлении сотового наполнителя из стеклоткани растяжением пакетов контролируемые параметры аналогичны параметрам, контролируемым при изготовлении сотового наполнителя методом растяжения из бумаги, описанным выше.

Изготовление сотовых наполнителей методом объемного ткачества (рис. 3.4) заключается в изготовлении многослойного тканого мата (рис. 3.4, а), слои которого переплетаются со смежными не по всей поверхности, а по линиям с определенным шагом. Между переплетенными полосами 1 (см. рис. 3.4, а) имеются несвязанные промежутки 2[3].

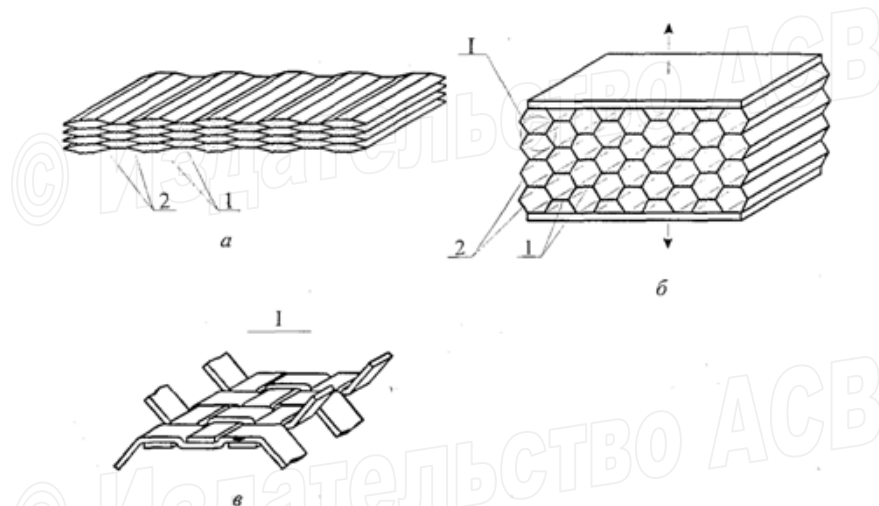


Рис. 3.4. Изготовление сотового заполнителя методом объемного ткачества: а – многослойный тканый мат; б – растяжение мата; в – участок соединения смежных трубчатых элементов переплетением

Подобно тому, как набирается пакет из листов при изготовлении сот растяжением пакета, переплетенные полосы и несвязанные участки чередуются в сечении в шахматном порядке. Таким образом, после растяжения мата образуется сотоблок с нужной формой ячейки (рис. 3.4, б).

Растянутый сотоблок пропитывается связующим путем окунания в ванну. Достоинством тканых сот является отсутствие соединений между соседними гофрированными лентами, так как вся конструкция получается цельной.

Изготовление сот методом объемного ткачества можно реализовать на модернизированном челночном ткацком станке Жаккара, который может работать по программе. Форма ячеек может быть получена треугольная, квадратная, шестигранная.

К преимуществам метода изготовления сотовых заполнителей на ткацком станке с программным управлением относятся:

- 1) более высокая прочность в местах соединения сот между собой благодаря механической связи, осуществляемой при движении основной нити от ячейки к ячейке;
- 2) возможность введения в конструкцию нитей различных материалов (например, стеклянных и металлических, стеклянных и асбестовых и пр.);
- 3) возможность изготовления сотового заполнителя вместе с одной из обшивок;

4) отсутствие остаточных напряжений и искажений формы ячеек, возникающих при укладке обычного сотового заполнителя, особенно на поверхности с малым радиусом кривизны. Сотовый заполнитель, снятый с ткацкого станка, имеет заданную кривизну поверхности и поэтому не подвергается деформации перед укладкой;

5) возможность получения сотовых заполнителей переменной толщины, что иногда позволяет исключить механическую обработку;

6) возможность усиления отдельных участков обшивки и заполнителя путем наращивания в этих местах ткани;

7) непрерывность волокон при изготовлении изделий любой формы;

8) полная механизация всех операций процесса и связанные с ней стабильность качества и высокая производительность;

9) сокращение трудоемкости и улучшение условий труда.

Снятые с ткацкого станка сотовые заполнители в случае необходимости подвергают механической обработке и затем растягивают до образования ячеек требуемой формы. В растянутом виде сотовые заполнители пропитывают один или несколько раз соответствующим связующим и сушат после каждой пропитки.

Подготовку торцов сотовых заполнителей, сборку и склеивание изделий производят обычными методами.

3.2.3. Изготовление сотовых заполнителей переменной высоты

Изготовление сотового заполнителя переменной высоты реализуется несколькими методами: фрезерованием готового плоского сотоблока по криволинейной поверхности, раскромом склеенного пакета листов с последующим растяжением, двойным гофрированием листовой заготовки.

В литературе [3] рассмотрены три метода получения сотового заполнителя переменной высоты:

1) фрезерование готового плоского сотоблока по криволинейной поверхности;

2) метод раскроа склеенного пакета листов с последующим растяжением.

3) метод получения сотоблока переменной высоты, являющийся модификацией метода двойного гофрирования и отличающийся от первых двух, тем, что в нем каждый надрез в продольном направлении выполняют по ломаной линии.

Механическая обработка сотовых заполнителей производится на фрезерных станках в специальном приспособлении грибковой фрезой при высоких оборотах (рис. 3.5) [3].

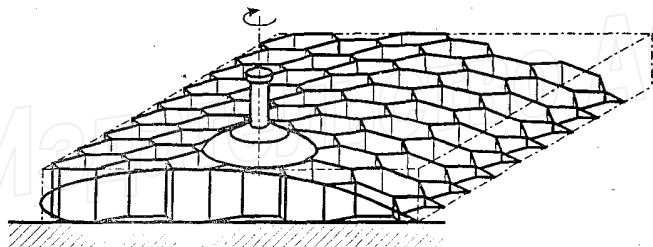


Рис. 3.5. Получение сотоблока переменной высоты фрезерованием

Для исключения деформации и получения гладкой поверхности сотовые блоки заполняют легкоплавкими веществами, которые после застывания придают им необходимую жесткость. В некоторых случаях для придания жесткости вначале одну из сторон склеивают с обшивкой, после чего фрезеруют другую поверхность.

Недостатком этого приема является трудоемкость заполнения и последующей очистки блока от легкоплавкого заполнителя.

Метод раскроя склеенного пакета листов с последующим растяжением является более распространенным (рис. 3.6) [3], в соответствии с которым из склеенного листового пакета вырезают по контуру заготовку нужной формы (рис. 3.6, а). Осуществляют это на фрезерных станках и вырубкой на штампах. Затем пакет растягивают до получения сотоблока (рис. 3.6, б) и фиксируют в нужном положении.

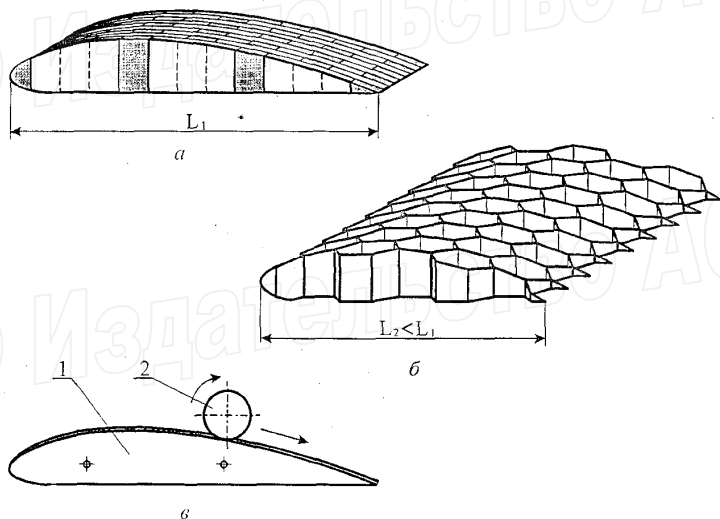


Рис. 3.6. Схема получения блока переменной высоты растяжением пакета: а – пакет с криволинейным контуром; б – растянутый сотоблок; в – прикатка роликом

Данный способ получения сот переменной толщины является более технологичным. Однако при растяжении раскроенной заготовки пакета за счет изменения объема его контур по обводам меняется. Предсказать с высокой степенью точности, какой формы получится огибающая поверхность, сложно, так как после растяжения сотовой заготовки ячейки не имеют строгую гексагональную форму. Поэтому в конце техпроцесса используют прикатку поверхности по копирам 1 роликом 2 (рис.3.6,в).

Метод получения сотоблока переменной высоты является по существу, модификацией метода двойного гофрирования (рис. 3.7) [3].

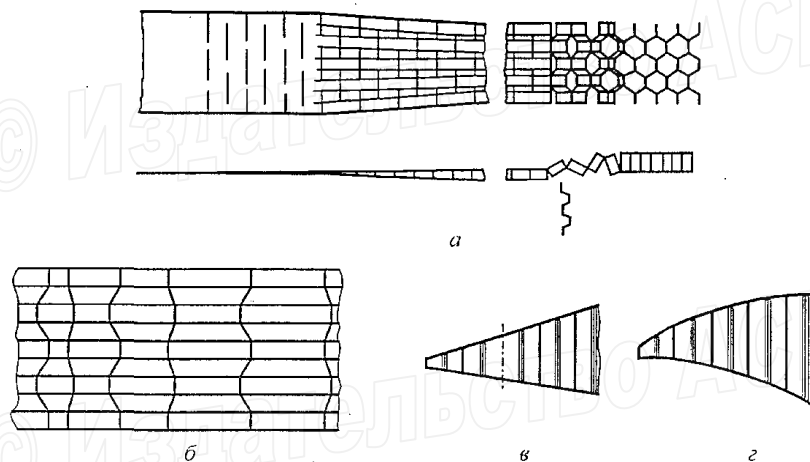


Рис. 3.7. Схема получения сотоблоков переменной высоты с предварительным гофрированием: а – изготовление плоской панели; б – схема нанесения надрезов; в, з – блоки переменной высоты

Предлагаемый способ отличается от рассмотренных выше, тем, что в нем каждый надрез в продольном направлении выполняют по ломаной линии (рис. 3.7, б). Она состоит из трех частей, средняя из которых перпендикулярна продольной оси полосы, а боковые наклонены к средней части под углом, определяемым в зависимости от угла между плоскостью, перпендикулярной к осям ячеек, и плоскостью, касательной к торцу каждой ячейки, и направлены в сторону увеличения высоты ячеек. Шаг между надрезами выполняют переменным, изменяющимся через четное число рядов.

На рис. 3.7, а показан листовый материал (вид в плане) в процессе выполнения надрезов, гибки относительно продольной оси и поперечной гибки по надрезам описываемым способом (на рис. 3.7, в –

сотовый наполнитель переменной высоты с плоскими поверхностями, на рис. 3.7, г – с криволинейными огибающими поверхностями). Длина надрезов, выполняемых на листовой заготовке (рис. 3.7, а), равна полупериметру ячейки. Шаг между рядами надрезов меняется в арифметической прогрессии и равен высоте сот в месте последующего изгиба после надрезки и гибки вокруг продольной оси.

В случае, когда наполнитель имеет одинарную кривизну, углы между отрезками ломаных линий одинаковы в каждом ряду и различны в соседних рядах. После выполнения надрезов материал изгибают относительно продольной оси, образуя профили, соответствующие профилю полужайки. Затем изогнутый материал с надрезами изгибают в «гармошку» по надрезам. Гибку производят с обжатием до соприкосновения материала с наименьшим радиусом изгиба.

3.3. Сборка и склеивание сотовых конструкций

Технологический процесс сборки по характеру выполнения можно разделить на две группы:

- сборка с использованием жидких клеев и заливочных вспенивающихся композиций, определяющих «сырую сборку»;
- сборку с использованием вспенивающихся при температурной обработке пленок, определяющих «сухую сборку».

Принципиальное различие указанных технологических процессов заключается в том, что при «сырой сборке» выполняют последовательно следующие операции: нанесение подслоя, нанесение клея, выдержка, термостатирование. Процесс соединения сотового наполнителя с каркасом при «сырой сборке» происходит без давления, что снижает степень заполнения клеевого шва и прочностные показатели.

«Сухую сборку» производят последовательно по схеме: обезжиривание поверхностей, прокладка пленок в стыках сотового наполнителя и элементов каркаса, сборка узла, термостатирование. В процессе термостатирования происходит вспенивание (увеличение объема) проложенных пленок и заполнение зазоров.

Стыки панелей для передачи усилий и обеспечения разъемов выполняются различными методами.

На рис. 3.8 приведены варианты соединения панелей между собой и с элементами каркаса. В местах соединения, как правило, вместо сотового наполнителя между обшивками закладывают вкладыши, профили, втулки цилиндрической или конической формы и т. п.

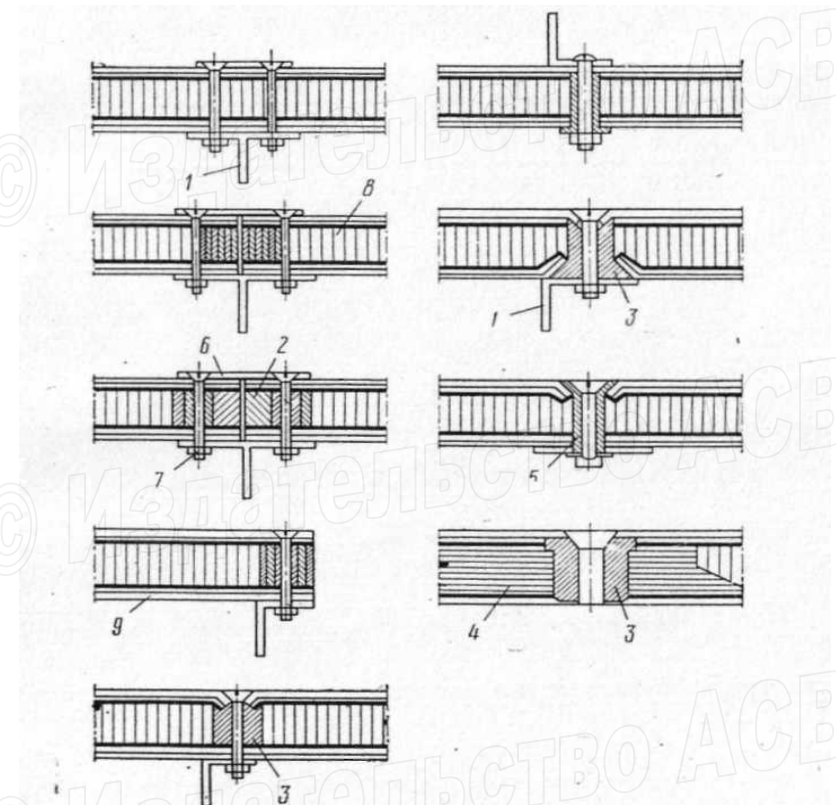


Рис. 3.8. Варианты соединения панелей между собой и с элементами каркаса: 1 – профиль; 2 – вкладыш; 3 – втулка; 4 – стеклоткань; 5 – втулка; 6 – накладка; 7 – болты; 8 – сотовый наполнитель; 9 – обшивка

Плоские панели собирают на вакуумных столах без приспособлений или в приспособлениях. Без приспособлений собирают панели простой конструкции, в которых отсутствуют сложные узлы, арматура, лючки и пр. Панели, выполненные на клеях горячего отверждения, подвергают нагреву в процессе склеивания. Для таких панелей в конструкциях вакуумных столов предусматривают подогрев рабочих плит электрообогревателями или паром. Вакуумные столы, не имеющие местного подогрева, загружают в электрические воздушные печи или в автоклавы.

Сборку панелей на вакуумных столах ведут в той же последовательности, что и предварительную сборку. По окончании сборки панель накрывают разрезанной тканью, а затем чехлом и герметизируют по контуру прилегания его к поверхности стола. Под чехлом соз-

дают вакуум с помощью вакуум-насоса, и выдерживают (с нагревом или без нагрева) в течение времени, потребного для полимеризации клея. Плоские панели небольшого размера склеивают на прессах с обогреваемыми плитами рабочего стола. Панели одинарной и двойной кривизны собирают на оправках, болванках, где фиксируют положение обшивок, вкладышей, сотовых заполнителей, деталей каркаса.

3.3.1. Предварительная сборка и разборка соединений

Предварительная сборка панелей, или, как ее называют, «сухая сборка», позволяет проверить согласованность размеров деталей, качество их прилегания в соединениях, соответствие наружных обводов деталей форме ложементов приспособлений, контуру болванок и рубильников.

Если сотовый заполнитель поступает на сборку не монолитным, а в виде отдельных заготовок, то в процессе предварительной сборки должно проверяться качество сопряжения этих заготовок друг с другом и с деталями каркаса.

Заготовки сотовых заполнителей располагают в шахматном порядке. Такой вид стыковки заготовок не приводит к заметному ослаблению сечения панели по линии стыка блоков заполнителя. Между собой заготовки склеивают вспенивающимися композициями, соединяют ячейку в ячейку или по выступающим граням.

Способы соединения сотовых заполнителей с обшивками и между собой приведены на схемах, указанных в табл. 3.1.

Листы обшивок в сотовых конструкциях из ПКМ соединяют между собой «на ус», а также с помощью накладок или вкладышей (рис 3.9).

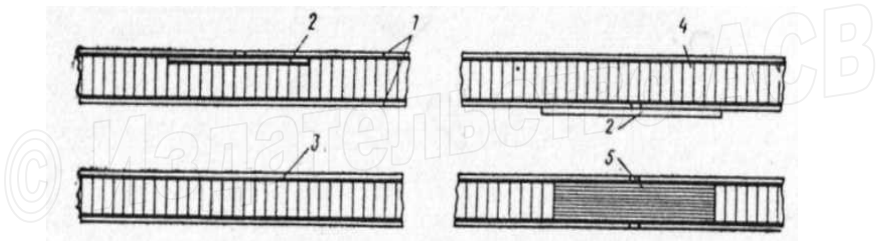


Рис. 3.9. Соединения обшивок в сотовых конструкциях:

1 – обшивка; 2 – накладка; 3 – стык «на ус»; 4 – сотовый заполнитель; 5 – вкладыш

При выборе варианта стыковки обшивок необходимо иметь в виду, что расположение накладок с внутренней стороны связано с необходимостью фрезерования сотового заполнителя, что сопряжено

с определенными технологическими трудностями. Поэтому по возможности не следует применять вариант с внутренней накладкой.

Таблица 3.1

Виды соединения сотового заполнителя с обшивками и между собой

Вид соединения	Типовая схема соединения
1) с обшивками посредством клеевых галтелей	
2) соединения сотового заполнителя между собой: – ячейка в ячейку; – встык боковых стенок ячеек с заливкой композицией сотовых ячеек; – встык с заливкой композицией по линии стыка; – встык с подмятием сот и заливкой композицией по линии стыка; – встык через промежуточный элемент с заливкой композиции	

Заготовки для панелей одинарной или двойной кривизны перед укладкой на ложемент или болванку изгибают на прессе или вручную до требуемой кривизны. Положение каждой заготовки на болванке должно быть строго определенным. Вот почему в спецификациях чертежей ряда изделий заготовкам сотовых заполнителей присвоены такие же номера, как и обычным деталям.

Вследствие высокой упругости заготовок не всегда удастся придать им необходимую форму. В таких случаях прибегают к нагреву заготовок до температуры, при которой они несколько размягчаются. Нагрев практикуют для сотовых заполнителей, пропитанных термопластичными связующими.

Во время предварительной сборки заполнители, имеющие кривизну, закрепляют на поверхностях болванок и оправок резиновыми жгутами, стеклотканевыми лентами и пр. К вогнутым поверхностям оправок и ложементов заполнители прижимают грузами или рубильниками. Подгонку вкладышей ведут с таким расчетом, чтобы они хорошо прилегали к боковой поверхности сотового заполнителя и обшивкам.

Утопание или выступание вкладышей по отношению к сотовому заполнителю допустимо только в пределах, предусмотренных техническими условиями. Значительные ступеньки приводят к непрочности в зоне сопряжения этих деталей. При сборке панелей с базировкой по наружной или внутренней поверхности имеет значение качество их сопряжения с ложементами приспособления или контурами болванок. Приспособления снабжают специальными прижимами, чтобы исключить возможность образования недопустимых зазоров в этих местах. Зазор между обшивками и заполнителем, обшивками и вкладышами не должен быть более 0,2 мм, а между боковыми поверхностями сотовых заполнителей и вкладышами – не более 0,3 мм. Величину зазоров измеряют в пакетах, прижатых с оптимальным давлением.

Разборку предварительно собранной панели ведут в последовательности, обратной сборке. Разобранные детали аккуратно складывают на стеллажи или в жесткую тару. Время хранения деталей перед подачей их на следующую операцию не лимитируется точными сроками, если они изолированы от пыли и грязи и если температурно-влажностные условия помещения не вызывают ухудшения свойств в отвержденных клеевых композициях и связующих.

3.3.2. Подготовка под склеивание обшивок и сотовых заполнителей

С обшивок и деталей каркаса из стеклопластиков перед склеиванием удаляют целлофан и смазки, оставшиеся после формования. Целлофан смывают горячей водой или паром, а смазки растворяют бензином. Поверхности стеклопластиков опескоструивают для придания им шероховатости. Со склеиваемых поверхностей слоистых пластиков иногда удаляют один слой ткани. В основном же поверхности слоистых пластиков опескоструивают либо зачищают наждачной шкуркой. После этого промывают ацетоном или другим растворителем. Пыль и стружку с поверхностей сотовых заполнителей удаляют вакуумным способом или сдувают сжатым воздухом. Торцовые поверхности сотовых заполнителей из ткани и бумаги шлифуют лишь в редких случаях, обезжиривают.

3.3.3. Нанесение клея на склеиваемые поверхности

Наиболее технологичным видом клея является пленка, особенно когда она применяется без подслоя жидкого клея. Однако из целого ряда клеев вообще не могут быть приготовлены пленки и поэтому их применяют только жидкими. Способы нанесения клея выбирают в зависимости от вязкости клея, конструкции детали, площади склеиваемой поверхности и программы выпуска панелей.

В серийном производстве клеи малой вязкости наносят на обшивки пневматическим или безвоздушным распылением. Такой способ нанесения позволяет получать очень тонкую и одинаковую по толщине клеевую прослойку. К недостаткам этих способов нанесения относят большие потери клея в окружающую среду и не совсем безопасные условия работы. В последнее время для улучшения труда рабочих применяют закрытые камеры, снабженные вентиляцией, в которых нанесение клея на обшивки производится краскораспылителями, автоматически перемещающимися над поверхностью листа. Рабочий же находится вне камеры и наблюдает за процессом через стекло.

На обшивки клеи наносят с одной стороны кистью или пропуская через вальцы. Обшивки для нанесения клея не погружают в ванну, так как при этом расход клея увеличивается в два раза за счет клеевого слоя на стороне, не подлежащей склеиванию.

В зависимости от начальной вязкости наиболее распространенные клеи, применяемые для склеивания, можно условно разбить на четыре группы. В первую группу входят клеи, обладающие малой вязкостью (от 5 до 30 с); вторую группу составляют клеи, имеющие среднюю вязкость (от 30 и до 60 с); в третьей группе находятся клеи, у которых вязкость лежит в пределах от 60 и до 100 с.; клеи высокой вязкости (свыше 100 с) составляет четвертую группу.

Клеи первой группы наносят распылением, разливом из щелей, обливом и кистью. Клеи, входящие во вторую группу, наносят вальцами, роликом, отпечатыванием и кистью. Клеи средней вязкости (третья группа) наносят вальцами, роликом и кистью. Клеи высокой вязкости могут наноситься шприцем, шпателем и т.п.

Клеевую пленку прикатывают либо к подслою жидкого клея на обшивке, либо непосредственно к склеиваемой поверхности обшивки. Необходимость подслоя на обшивке определяется свойствами клея.

Прикатывают пленки холодным или горячим роликом. Температуру нагрева ролика устанавливают опытным путем в зависимости от марки клея. Для прикатки пленок к обшивкам созданы средства механизации.

Некоторые из перечисленных способов нанесения жидкого клея достаточно эффективны и для деталей каркаса (вальцы, ролики, кисть).

На торцовые поверхности сотовых заполнителей клей наносят способами окунания, накаткой роликом или распылением. Заполнитель погружают в ванну с жидким клеем на глубину 1,5–2 мм. После некоторой выдержки в жидком клее (5–10 с.) его вынимают из ванны и в горизонтальном положении, покрытой поверхностью вниз, сушат при нормальной или повышенной температуре (в зависимости от примененной марки клея). Клей, стекая со стенок сот, образует приливы (галтели). Затем при необходимости сотовый заполнитель погружают в ванну второй и иногда третий раз. После каждого погружения делают промежуточную сушку.

При нанесении клея роликом не всегда удастся равномерно его распределить по поверхности сотового заполнителя.

Несмотря на это, способ нанесения клея роликом нашел широкое применение, особенно при выполнении работ в приспособлении или на болванке.

Распылением клея по поверхности сотового заполнителя трудно получить хорошие галтели в ячейках. Причиной этого является малая вязкость распыляемого клея. Потери клея в окружающую среду при таком способе нанесения его на торцы сотовых заполнителей составляют не менее 40–50 %.

Распыление не применяют для нанесения клея на сотовые заполнители из тканей и бумаги.

3.3.4. Склеивание и формование сотовых конструкций

Склеивание плоских панелей производят в простых приспособлениях. Предварительно ложемент приспособления покрывают составом (разделителем), позволяющим легко снять панель после склеивания. Затем устанавливают обшивку (декоративный слой, соединенный с препрегом) рисунком к ложементу. На обшивку кладут лист препрега, выполняющий функции клеевой пленки. Контур панели заделывают вкладышами, изготовленными из пенопласта. Каждый вкладыш закрепляют фиксирующими устройствами приспособления. Сотовый заполнитель располагается на участке, ограниченном вкладышами. После этого поверх сотового заполнителя, собранного с вкладышами, кладут лист препрега. Приспособление покрывают нейлоновой пленкой, которую герметизируют по контуру. В полости приспособления создают вакуум, который поддерживают в течение всего процесса склеивания. Приспособление с собранной в

нем панелью под вакуумом загружают в электрическую камерную воздушную печь. Панель склеивается при $t = 120^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч. и охлаждается под вакуумом до температуры 18–20° С.

Наибольшее распространение получило вакуумно-автоклавное формование (ВАФ).

Формование – это этап технологического процесса, при котором происходит отверждение связующего. В этот период создается конечная структура материала, формируются его свойства и фиксируется форма изделия.

Метод ВАФ получил наибольшее распространение благодаря своей универсальности, надежности промышленного оборудования, стабильности и воспроизводимости качества изделий.

ВАФ состоит из операций нагрева, изотермической выдержки и подачи давления, а также подготовки пакета – заготовки и технологической оснастки к формованию в автоклаве.

После помещения формуемой заготовки вместе с оснасткой в автоклав проводятся операции ВАФ, параметрами которого являются температура, давление, степень вакуума и время.

Основное назначение проводимых операций следующее:

- вакуумирование обеспечивает разряжение и надежный контакт формующей оснастки с изделием, облегчаются фильтрация, и отжим избытков связующего в дренажные слои, дегазация связующего и смачивание;

- подача давления как силовой фактор обеспечивает формообразование детали за счет прижима заготовки к оформляющим поверхностям оснастки, протекание процессов фильтрации и отжима излишков связующего, достижение большей полноты контакта фаз по поверхности раздела;

- нагрев обеспечивает разогрев связующего, при котором первоначально происходит существенное снижение его вязкости, что обеспечивает возможность уплотнения материала и его формообразования.

3.4. Изготовление сотовых конструкций с криволинейной огибающей поверхностью

В литературе [3] рассмотрены способы получения сотовых панелей криволинейной формы с сотовым заполнителем.

Первые два способа предполагают изготовление на первом этапе плоской трехслойной панели (рис. 3.10, а) с последующим приданием ей кривизны: обтяжкой по пуансону (рис. 3.10, б) и гибкой прокаткой (рис. 3.10, в) [3].

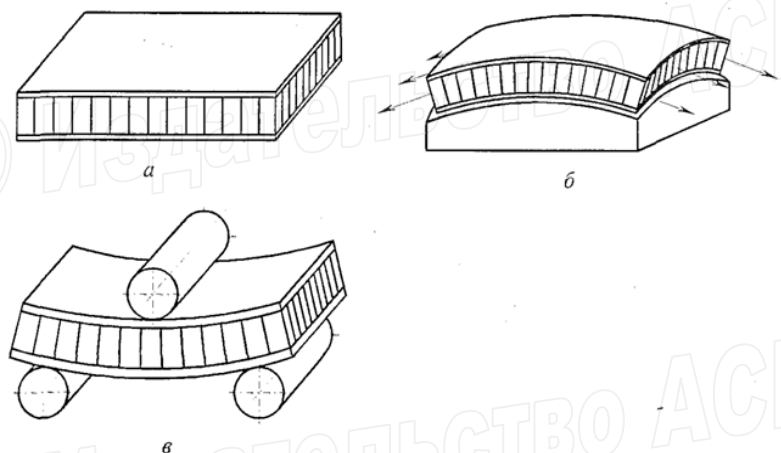


Рис. 3.10. Придание трехслойным панелям кривизны: *a* – исходная панель; *б* – получение панели двойной кривизны обтяжкой; *в* – формообразование гибкой-прокаткой.

Недостатками данных методов являются искажение формы сот, возможное разрушение их в зоне склейки лент между собой и с обшивкой, потеря устойчивости стенок ячеек.

Третий способ заключается в укладке сотового блока между обшивками, имеющими необходимую криволинейную форму. Однако данный метод пригоден при незначительной высоте заполнителя, так как при большой толщине сотового блока при изгибании его на цилиндрическую поверхность в ортогональной плоскости появляется вторичная (наведенная) кривизна другого знака (седловидность) (рис. 3.11) [3].

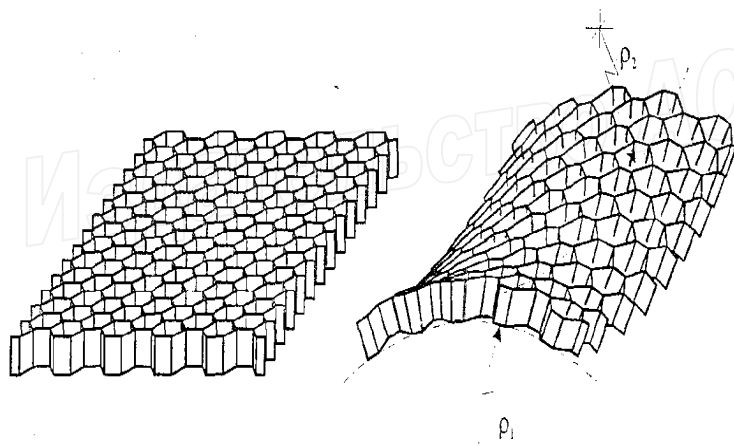


Рис. 3.11. Появление седловидности при изгибе плоского блока

Эффект появления наведенной кривизны усиливается с увеличением высоты (толщины) сотовых блоков.

В литературе [3] рассмотрены способы, позволяющие обеспечить кривизну огибающей поверхности сотового блока перед его соединением с обшивками. Один из них является модификацией технологической схемы склейки пакета с последующим его растяжением. Для получения сотового заполнителя цилиндрической формы клей наносят на соединяемые листы в виде полос трапецевидной формы.

Основной причиной того, что данный метод не нашел широкого практического применения, является сложность нанесения клеевых полос трапецевидной формы с точными размерами.

Можно отметить метод получения конструкций двойной кривизны, в котором сотовый заполнитель образован зигзагообразно изогнутыми полосами (рис. 3.12), соединяющимися только в нижних участках линий изгиба 2.

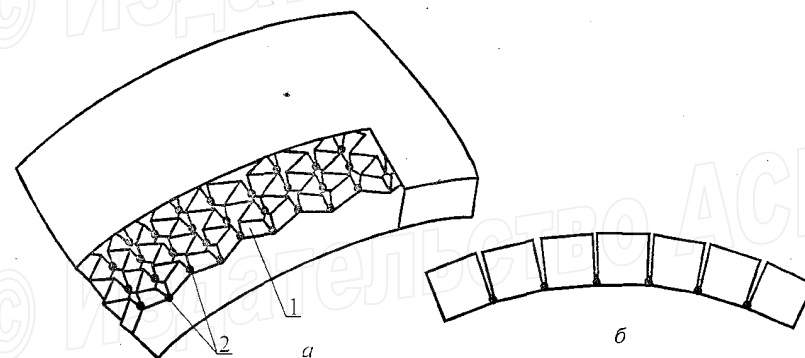


Рис. 3.12. Схема получения криволинейного сотового блока путем локального соединения структурных лент

За счет шарнирного соединения смежных полос в нижней зоне объемный заполнитель имеет возможность изгибаться в двух плоскостях, что обеспечивает возможность получения панелей двойной кривизны.

К недостаткам данной схемы следует отнести то, что прочность сот существенно снижается из-за отсутствия соединения по всей высоте зигзагообразных лент. Кроме того, выполнение шарнира между лентами является сложной технической задачей.

3.5. Механическая обработка сотового заполнителя из ПКМ

Наибольшую сложность представляет механическая обработка блоков сотовых заполнителей, состоящая из следующих операций:

разрезка сотовых блоков на заготовки по прямолинейным и криволинейным поверхностям; фрезерование; обрезка припуска по контуру; плоское и криволинейное шлифование; снятие скосов и занижений; образование отверстий, пазов, уступов, проемов.

Подлежащие механической обработке сотовые заполнители крепятся к столу станка или к нижней плите приспособления различными способами:

- льдом;
- термопластичными смолами;
- ксилитом;
- полиэтиленгликолем;
- липкими листами;
- клеями на резиновой основе;
- к магнитной плите станка посредством мелких стальных шариков, засыпаемых в ячейки;
- к вакуумной плите станка через обшивку, предварительно приклеенную к заполнителю;
- к элементам каркаса склеиваемого агрегата посредством вспенивающейся клеевой композиции, не удаляемой после фрезерования.

Способ крепления льдом предусматривает заливку воды в заполнитель на 1/3 его высоты с последующим ее замораживанием. После окончания механической обработки сотовый заполнитель размораживают горячей водой ($T = 70\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$), пропускаемой через каналы приспособления. Затем заполнитель просушивают.

Недостатки способа крепления льдом: возможность попадания воды на детали и узлы станка, нарушение прочности клеевых соединений ячеек при размораживании, повышенная загрязненность рабочих мест.

По сравнению со льдом более технологичны ксилит и полиэтиленгликоль. Ксилит нейтрален, не действует на металл и клеевые соединения, полностью удаляется из заполнителя горячей водой, расплавляется при $T = 120\text{--}140\text{ }^{\circ}\text{C}$ и заливается в предварительно обезжиренное приспособление на высоту 5–10 мм. Сотовый заполнитель погружают в ксилит при $T = 75\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и прижимают к нижней плите приспособления грузом. Затверждение ксилита ускоряют обдувкой сжатым воздухом или пропусканием по трубам холодной проточной воды. По окончании обработки ксилит расплавляют, из расплавленного ксилита сотовый заполнитель вынимается легко.

Ксилит может быть использован многократно, при загрязнении его фильтруют через металлическую сетку.

Полиэтиленгликоль имеет ряд преимуществ перед ксилитом: температура плавления и отверждения в два раза ниже, отсутствуют

пылеобразование и парообразование, обладает смазывающим действием при механической обработке.

Полиэтиленгликоль – твердое водорастворимое нейтральное вещество, плавится при $T = 50\text{--}52\text{ }^{\circ}\text{C}$, в расплавленном состоянии – легкоподвижная жидкость, застывает при комнатной температуре, обладает хорошей адгезией к металлическим поверхностям.

Крепления, сотового заполнителя к элементам каркаса склеиваемого агрегата по контуру посредством вспенивающейся клеевой композиции, не удаляемой после фрезерования, позволяет вести механическую обработку сотового заполнителя с ориентацией на каркас, что облегчает получение требуемого (без ступенек) перехода в зоне «каркас – заполнитель».

Разрезка сотовых блоков по прямолинейным и криволинейным поверхностям производится обычно на ленточных пилах, оснащенных кареткой для перемещения сотового блока в процессе резки.

Сотовые заполнители по торцам фрезеруют на станках с ЧПУ, на копировально-фрезерных станках, на обычных вертикально – и горизонтально-фрезерных станках и на модернизированных строгальных станках.

Используют также специальные копировально-фрезерные станки для обработки поверхностей сотовых заполнителей конической формы и двойной кривизны.

Для фрезерования в сотовых заполнителях пазов и уступов применяют переносные ручные механизированные пневматические головки. Наличие таких головок позволяет получать пазы вне стационарного оборудования, что в некоторых случаях является эффективным с точки зрения организации производства.

Более высокая чистота поверхности при фрезеровании достигается при прокладывании с обеих сторон пакета листов фанеры, которые фрезеруют одновременно с пакетом.

Шлифование применяется для получения поверхностей высокой точности. Плоские поверхности шлифуют на ленточно-шлифовальных станках абразивными лентами, криволинейные – на специальных шлифовальных станках с копировальным устройством.

Для фиксации сот и придания им необходимой жесткости при обработке используют временные технологические наполнители ячеек – замороженную воду, парафин и пр.

Высокие температуры, возникающие в процессе резания, вызывают таяние льда и, как следствие, появление заусенцев. Применение в качестве технологического наполнителя парафина может привести к засаливанию ленты. Хорошее качество поверхности при шлифова-

нии получают при наполнении ячеек селитрой, применяют также ксилит и полиэтиленгликоль.

Уступы и пазы в сотовых заполнителях получают с помощью дисковых ножей, частота вращения которых должна лежать в пределах 5–10 тыс. об/мин.

В сотовом заполнителе, составленном из отдельных блоков, на поверхности под обшивку могут быть ступеньки в местах стыка из-за неточной разрезки. Поэтому разрезку сотовых блоков на заготовки необходимо вести в специальных приспособлениях, в которых подача жестко закрепленного блока на заданный размер осуществляется до упора. Боковые грани сотовых заполнителей не прикатываются. Заусенцы, образующиеся на торцовых поверхностях после механической обработки, удалению не подлежат. Обычно поверхности уложенного в приспособление сотового заполнителя шлифуют.

3.6. Контроль качества сотовых конструкций

Качество деталей зависит от качества входящих элементов, соблюдения требований конструкторской документации (КД) и режимов технологического процесса. Поэтому необходим тщательный пооперационный контроль в процессе изготовления сотовой конструкции.

Не допускаются: расслоения, трещины, механическая доработка, непрочности. Для снятия глянца с наружного контура детали перед нанесением ЛКП допускается применение шлифовальной шкурки.

Контроль непрочностей выполняют импедансным методом.

Контроль на непрочности тонкостенных деталей из двух слоев препрега допускается производить методом простукивания текстолитовым молоточком.

Окончательный контроль агрегатов производится на:

- качество поверхности – визуальным осмотром;
- соответствие габаритных размеров – согласно КД;
- отсутствие непрочностей (производить методом простукивания текстолитовым молоточком);
- качество формования – определением прочности образцов-свидетелей.

Перед выполнением операций контроля (измерений, испытаний) необходимо убедиться в исправности средств измерений, пользуясь следующими критериями негодного состояния:

- отсутствие заводского или порядкового номера средств измерения (СИ), указанного в свидетельстве о проверке;
- отсутствие или нарушение клейма (пломбы в месте вскрытия) СИ;
- несоответствие комплектности СИ формуляру (паспорту);

– наличие механических повреждений (вмятины, забоины, искривления, следы износа рабочих поверхностей, трещины, которые влияют на работу прибора);

– нечеткость маркировок;

– наличие следов коррозии, окисления на размерах, соединительных гнездах, на разъемах соединительных проводов, кабелей, переходов, рабочих поверхностях;

– невозможность настройки прибора в соответствии с инструкцией по эксплуатации (плохое качество работы переключателей и плавности работы органов управления);

– отсутствие четких надписей и обозначений на передних и задних панелях прибора, гравировки, оцифровки шкалы.

Применяемые в технологическом процессе стандартные инструменты приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Инструменты, применяемые в технологическом процессе

Наименование прибора	Обозначение прибора	Государственные стандарты и технические условия	Назначение прибора
Штангенциркуль	ШЦ-1-125 0...125 мм ц.д. 0,1 мм	ГОСТ 166-89	Контроль размеров
Линейка	0...500 мм ц.д. 1 мм	ГОСТ 427-75	
Весы торговые	0...100 кг ц.д. 5 кг	ТУ25-06.575-77	Контроль массы
Весы	ВЛКТ-5002-М 0...500г ц.д. 0,01г, 4 кл.т.	ТУ25-06.1101-79	
Часы	любой марки		Контроль времени
Гигрометр психометрический	ВИТ 0...40 ц.д. 0,2±0,2	ТУ25-11-1645-84	Контроль температуры влажности

4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЁХСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

4.1. Физико-механические свойства трёхслойных композитных сэндвич-панелей с комбинированным наполнителем из углеродного волокна

Постоянные усилия для повышения структурной эффективности и поглощения энергии воздействия массы чувствительными структурами мотивируют интерес к ультра-легким конструкциям из сэндвич-панелей [4]. Применяют панели, изготовленные из материалов, обладающих высокой удельной жесткостью и прочностью, разделенные на сектора с неплотной сотовой топологией [5], легких металлов, композитов [6] и пеноматериалов с закрытой топологией секций из жестких полимеров [7, 8]. Различные компании также пытаются применять металлопену в качестве более жесткой и прочной замены дешевым пенопластам и в качестве менее дорогостоящей альтернативы сотам [9, 10].

Открытые секции имеют слабое соединение в узлах, и, как правило, в них преобладают изогнутые структуры. В результате они обладают низкой эластичностью и прочностью на сжатие, особенно те из них, которые имеют низкую плотность. Гибсон и Эшби [11] показали, что модуль упругости Юнга пеноматериалов E зависит от топологии их секций (открытые или закрытые) и относительная их плотность $\bar{\rho}$ определяется как отношение плотности пеноматериала к плотности по модулю упругости твердого материала, из которого они изготовлены E_s . Для открытых секций коэффициент степени плотности может быть записан в виде соотношения

$$\frac{E}{E_s} = C\bar{\rho}^2,$$

где C – константа, зависящая от топологии изготовления секций (примерно равна единице для многих открытых топологий).

Неэластичное разрушение полимерных пеноматериалов обычно происходит в области постоянной «плато (пологий участок кривой)», где напряжение, превосходящее пластичность деформации (порядка 0,6), прекращается в связи с уплотнением при деформации:

$$\varepsilon_D = 1 - 2\bar{\rho}.$$

Для открытых секций, прочность плато σ_{pl} пропорциональна пределу текучести материала σ_{ys} , из которого изготовлен пеноматериал, но имеет степень при значении относительной плотности [11]:

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = C_1\bar{\rho}^{-3/2},$$

где: C_1 – постоянная пропорциональности.

Энергия, поглощенная в единице объема во время разрушения пеноматериалов при уплотнении деформации, может быть получена интегрированием смомента реакции на деформацию до начала уплотнения. Для идеального пеноматериала с напряжением, перпендикулярным растяжению, запасенная энергия в единице объема [11, 12]:

$$\sigma_{pl}(1 - 2\bar{\rho}).$$

Быстрая потеря в запасе энергии, уменьшается относительная плотность и прочность, эти потери могут быть смягчены путем использования закрытых секций.

У закрытых ячеек есть кромки сот, которые изгибаются и растягиваются при сжатии, и грани, которые также растягиваются. Соотношение между модулем Юнга и относительной плотностью пеноматериала с закрытыми секциями включает в себя значения от кромок сот и граней, в результате чего относительная плотность пеноматериала рассчитывается по формуле [11]

$$\frac{E}{E_s} = C_2\phi^2\bar{\rho}^2 + C'_2(1 - \phi)\bar{\rho},$$

где C_2 и C'_2 – константы пропорциональности для сотовых кромок (изгиб структур) и сотовые грани (которые деформируют путем растяжения мембран), а ϕ представляет собой долю твердого вещества в кромках сот.

Постепенное пластическое деформирование соприкасающихся закрытых ячеек, действующих друг на друга с большим удельным давлением, также привносит вклад в растяжение сотовых граней и определяется по формуле

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = C_3(\phi^2\bar{\rho})^{3/2} + C'_3(1 - \phi)\bar{\rho}.$$

В результате растяжения показатели у закрытых ячеек выше, чем у открытых эквивалентов и, следовательно, предпочтительнее для защиты от ударов. В то время как эти пенопласты отличные поглотители энергии удара, структурная эффективность пенопласта сэндвич-панелей уступает сотовой и некоторые другим схемам топологии сердечника [13].

Поиск эффективных конструкций ячеек сердечника привел к развитию конструкций многорешетчатых ферм, сделанных из металлов с высокой удельной прочностью, таких как титан [14] и алюминий [15]. Они, как было показано, демонстрируют превосходную жесткость и прочность по отношению к идентичным по концентрации закрытым ячейкам пенопластов, изготовленных из того же материала [16, 17]. Это происходит потому, что решетчатые конструкции имеют высокую прочность узловых связи и полностью выдерживают растягивание. Дешпанд и Флек [18], проанализировав процесс перераспределения нагрузки на четырехгранные и пирамидальные ферменные конструкции, предполагают, что линейная зависимость между эластичностью решёток, плотностью используемого для изготовления материала и относительной плотностью сердечника задается формулой

$$\frac{E}{E_s} = \bar{\rho} \sin^4 \omega,$$

где ω – угол наклона фермы (как правило, 45–55°).

Соотношения также показывают, что для малого растяжения ферм, которые не закреплены, прочность решетки была пропорциональна прочности твердого материала, используемого для изготовления фермы σ_y , и относительной плотности решетки:

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \bar{\rho} \sin^2 \omega.$$

Поскольку эластичность и прочность решетчатых конструкций значительно превышает, эквивалентных вспененных материалов, было разработано несколько производственных подходов, чтобы использовать решетчатые конструкции для сердечников трехслойных конструкций. Например, алюминиевые фермы сердечников производили с помощью экструзии или сгибания, чтобы показать хорошие механические характеристики в обоих случаях: сжатия и сдвига [15, 19]. Решетки из титанового сплава хорошо показали себя и при сильном сжатии и растяжении, а также использовании при высоких

температурах [20, 21]. Низкая плотность волокон армированного углеродным волокном пластика (углепластика) решетки также привлекла значительный интерес к сердечникам ультралегких трехслойных конструкций [22–29]. Например, сотовые заполнители сэндвич-структур из углепластика были сделаны из 0° / 90° армированных слоистых пластиков с использованием просечки отверстий и клеевого соединения. Было установлено, что они обладают высокой прочностью на сжатие и сдвиг [19]. Решетчатые конструкции из углеродного волокна также были сделаны путем горячего пресс-литья из углеродных препрегов (полуфабрикат композиционного пластика) [23–25] и механического метода «соединение на защёлках» [26, 27].

Прочность на сжатие решетчатых конструкций, сделанных из слоистого пластика (ламинатов), при малой относительной плотности определяется эластичными изогнутыми опорами или расслоением слоистого материала фермы (расщепление прослойки). При сдвиге прочность клея, используемого для крепления фермы к облицовочной поверхности, также ограничена подобным фактором. Кроме того, использование 0° / 90° ламинатов приводит к тому, что в лучшем случае половина волокон ориентирована в направлении нагрузки, приложенной к ферме. Поэтому прочность углепластика фермы может быть увеличена путем наращивания фракции волокон, выровненных в направлении нагрузки, создания фермы, которая лучше способна выдерживать взаимодействие при расслоении, и разработки более надежного метода сцепления в узлах облицовочной поверхности. Однако, как только в хрупких стойках из углепластика выявится недостаток, остаточная прочность решеток будет низкой, и поэтому углепластиковая структура сердечника может плохо подходить для поглощения энергии удара.

Мы рассмотрим подход использования плетеного углеродного волокна для изготовления пирамидальной структуры решетки, тем самым усилив закрытые ячейки пенопластов в композитной углепластиковой ферме и пенопластовом ядре сэндвич-панели. Плетеные фермы не являются ламинированными материалами. В принципе это исключает расслаивание и нештатную ситуацию. Кроме того, все волокна выравниваются в течение нескольких градусов от оси плетения, которая может повысить осевую прочность при сжатии стойки. Мы исследовали комбинированные и пустые решетки панелей, варьируя прочность пеноматериалов при механическом воздействии, сжатии и сдвиге. Мы считаем, что структура композита/пеноматериалов имеет прочность, которая складывается из прочностей пеноматериала и пирамидальной решетки. Что интересно, мы также считаем, что

форма поперечного сечения (и, таким образом, сила давления на композитные стойки) регулируется сопротивлением пеноматериалов при разрушении (поддержание давления) с переносом смолы в процессе изготовления. Это привело к синергическому увеличению прочности стойки, так как прочность пеноматериалов при сжатии была увеличена. Энергия, поглощенная во время разрушения этих комбинированных структур, существенно превысила те же показатели для структур из углепластиковых решеток и пеноматериалов.

4.2. Подходы к разработке и изготовлению трёхслойных композитных сэндвич-панелей с комбинированным наполнителем из углеродного волокна

4.2.1. Разработка схемы сэндвич-панелей

Трёхслойная композитная сэндвич-панель с комбинированным наполнителем из углеродного волокна схематически представлена на рис. 4.1. Сердечник панели собран из углеродной плетёной сетки и призматических брусков пеноматериала (с закрытыми ячейками), для формирования гибрида углепластиковой пирамидальной решетки и наполнителя. Сердечник скреплен с лицевыми панелями стежками из кевларовой нити, и затем эта структура была обработана эпоксидным клеем и затвердела. Закрытые ячейки пеноматериала из полимерных вставок служат для ряда целей. Они поддерживают и задают форму поперечного сечения стропил, поддерживают равномерное разделение облицовки, увеличивают площадь клеевых соединений с гранями и обеспечивают прочность и сохранение энергии во время последующего сжатия и сдвига нагрузки.

Для исследования прочности пеноматериалов были использованы их различные вариации (ввиду повышенной плотности). В табл. 4.1 приведены плотности и механических свойств пеноматериалов, используемых в исследовании. Среди них пеноматериал с закрытыми секциями PBX Divinycell (эритрен/бутадиен) с плотностью 80–250 кг/м³ и прочностью на сжатие 1,6–6,8 МПа, а также синтактик-пена (синтактическая пена – композитный материал в виде газонаполненных пластиков, наполнителями в которых служат полые сферические частицы (из синтетических полимеров, стекла и др.), равномерно распределенные в полимерном связующем. Наличие пустотелых частиц в толще материала обеспечивает его малую плотность, повышенную прочность, пониженный коэффициент теплового расширения, а также, в некоторых случаях, радиопрозрачность), состоящая из полых стеклянных шариков в полимерной матрице с

плотностью 320–448 кг/м³ и прочностью на сжатие 10–26 МПа. Очень слабый, но легко удаляемый пенополиуретан также применяется для получения образцов, т.е. может быть измерено механическое воздействие на решетки. Пеноматериалы были обработаны фрезеровочным станком с ЧПУ для создания трапециевидных сечений призмы с закруглениями, прорезанными канавками радиусом 2,25 мм, содержащимися в углеродной волоконной плетёной решётке с выемкой диаметров до 4,5 мм.

Таблица 4.1

Общие свойства пеноматериалов

Материал	Плотность (кг/м ³)	Прочность сжатия (МПа)	Прочность растяжения (МПа)	Модуль упругости при сжатии (МПа)	Модуль упругости при растяжении (МПа)
Пенополиуретан	32	0,172	0,152	-	-
Эритрен (бутадиен) H80	80	1.3	0.95	85	23
Эритрен (бутадиен) H100	100	2	1.4	115	28
Эритрен (бутадиен) H130	130	2.7	1.9	145	40
Эритрен (бутадиен) H200	200	4.2	3.2	265	65
Эритрен (бутадиен) H250	250	6.8	3.9	350	81
Синфоам H20	320	10	6.4	360	110
Синфоам H24	384	16	9.8	460	125
Синфоам H28	448	26	14.2	575	140

Прим.^[1]: (Synfoam – синфоам) – извитая термопластичная пряжа из полиамидного или полиэфирного волокна.

Трёхмерное плетение лицевой панели из углеродной нити

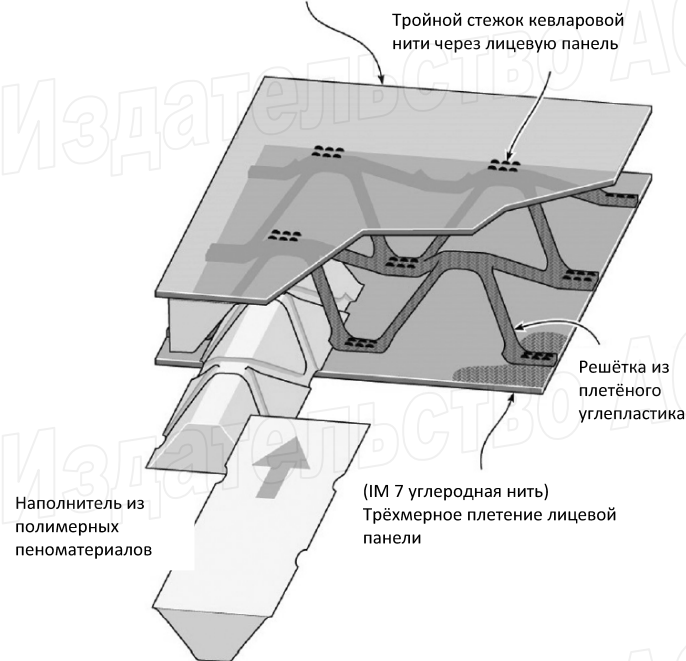


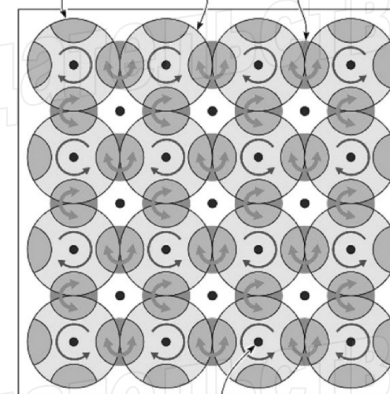
Рис. 4.1. Комбинированная композитная структура сердечника, состоящая из решетки из плетёного углепластика с полимерным наполнителем, и облицовочные композитные панели из углеродной ткани

4.2.2. Плетение эластичной сетки

Трёхмерные плетения [30–34] были использованы для создания плетёной углеродной сетки, фермы которой содержат разнонаправленные армирующие волокна с углом отклонения от продольной оси фермы не более 11° . Основные преимущества трёхмерных плетёных заготовок заключаются в том, что их структуры могут быть изготовлены из различных компонентов (при желании и бесступенчатых) [32, 33], их жесткость на сдвиг и кручение значительно выше, чем у традиционной слоистой структуры, а ориентацию волокон можно контролировать. Количество фракций волокон в трёхмерном плетении композита также может широко варьироваться в зависимости от требований к матричной пропитке, упрочнению и уплотнению различных типов смол.

Используемый процесс 3BRAID® (от англ. *Braid* – плетение) разработан и включает три степени свободы [32] (рис. 4.2):

а) Оплёточное устройство Шестерня Вилочное зацепление



Осевое направление подачи нити

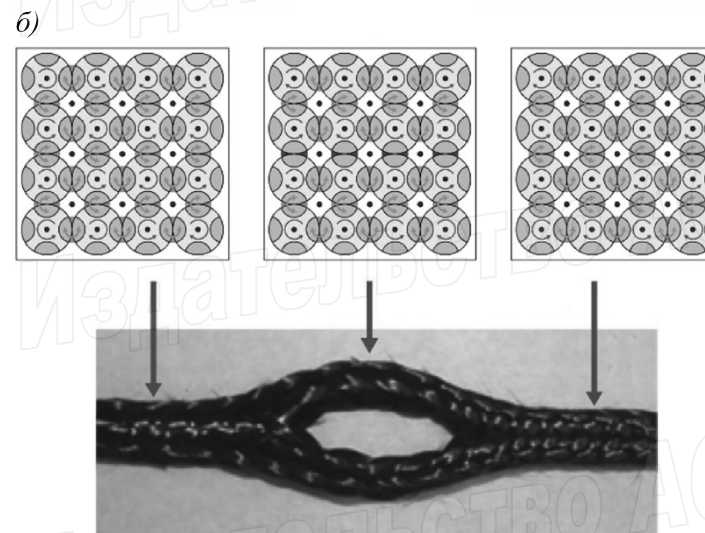


Рис. 4.2: а – схема одиночного модуля из 64 оплёточных устройств, используемого для трёхмерного переплетения; б – в ходе процесса 3BRAID® происходит управление формой заготовки, при расцеплении вилочного зацепления осуществляется ветвление, а вторичное соединение вилочного зацепления приводит к повторному соединению

На рис. 4.2, а представлена схема одиночного модуля, включающего в себя 64 оплёточных устройства. Каждый из 16 больших кругов представляет собой шестерню, окружённую 4 серыми голов-

ками оплёточного механизма, в то время как меньшие круги представляют собой вилочное зацепление. Все контакты вилочного зацепления при работе являются активными и отмечены на рисунке. Шестерня [35], в которой содержатся 4 головки оплёточного механизма, первоначально осуществляет 1/4 оборота. Вилка шестерни располагается в свободных секциях, затем происходит замена нитеводителя при выполнении 1/2 оборота. Наконец, система обмотки наращивает плетение, предварительно определяя дистанцию.

При предварительной регулировке формы в процессе 3BRAID® могут быть использованы 3 метода. Они включают в себя: избирательное управление или расщепление отдельных вилок, расположение в определённом порядке оплёточных устройств на машинной платформе в сочетании с избирательным управлением отдельными вилками и с учетом размещения осевых нитей. Избирательное управление отдельными вилками позволяет контролировать смену оплёточных устройств между шестернями, которые могут быть использованы, чтобы определить характеристики внутренних отверстий и наружной поверхности заготовки.

На рис. 4.2, б показаны вилочные сцепления, в которых будет происходить смена оплёточных устройств, и вилки, в которых не будет происходить никаких замен. В этом примере заготовка квадратной формы обрабатывается путем использования всех шестерней и вилочных сцеплений, делится на 2 небольшие части прямоугольной формы путем расщепления центральных вилок в течение нескольких машинных циклов, а затем возвращается к сцепленному состоянию. Чередую разъединения и сцепления от одного участка плетёного шаблона к другому, происходит формирование фермы или сеточной архитектуры. Процесс разъединения и сцепления происходит непрерывно во всё время производства трёхмерного переплетения.

Плетеные сетки в этом примере были сделаны из 24 жгутов 12K (12 тыс. волокон на жгут), состоящих из материала Hexcel IM7, углеродного волокна. IM7-волокно имеет прочность на разрыв 5,67 ГПа, эластичность 276 ГПа, и плотность 1800 кг/м³ (рис. 4.3). На рис. 4.3, а представлены структурные параметры этого жгута, а на рис. 4.3, б показан участок оплетки, используемой здесь. Угол плетения $\phi = 11^\circ$, диаметр $d = 4,5$ мм, а период идентичности переплетений $\lambda = 25$ мм. Плотность сетки составляет 442 кг/м³, а геометрия элементарной ячейки показана на рис. 4.3, в.

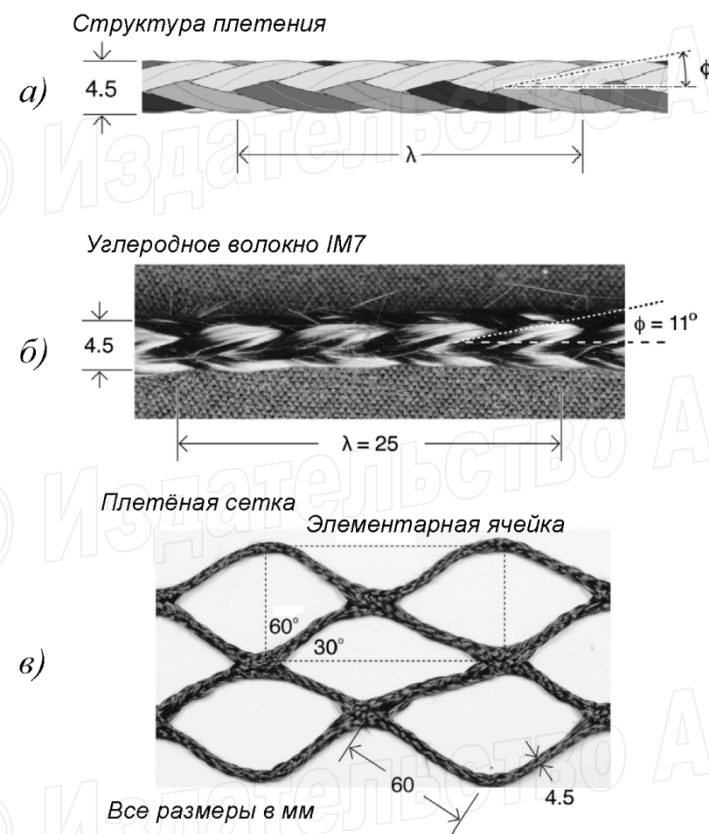


Рис. 4.3: а – схематичная иллюстрация структуры плетёной углеродной нити; б – фотография секции плетёной нити; в – структура плетёной сетки и размеры элементарной ячейки

4.2.3. Сухой монтаж сэндвич-панелей

Сухой монтаж комбинированной фермы из пеноматериала и углеродного волокна в сердечник сэндвич-панели схематически изображен на рис. 4.4.

Плетёная углеродная сетка стежками пришивается к лицевой панели, (рис. 4.4, а). Затем формируется канал с пазами радиуса 2,25 мм для вставки секций из пеноматериала, как показано на рис. 4.4, б, и вставляются секции из пеноматериала в оплетку фермы диаметром 4,5 мм (рис. 4.4, в). Оплетка затем пришивается стежками к нижней поверхности панели, и процесс повторяется для формирования пирамидальную структуры (рис. 4.4, г). Узлы в лицевой панели были

усилены с помощью трех стежков из кевларовой нити примерно 15 мм в длину. Лицевые панели 3Weave™ были сделаны из углеродных волокон 12K Hexcel IM7 в компании 3Tex Inc. Лицевая панель состоит из широких нитей углеродного волокна, направленных в сторону осей X, Y и Z: 43% рентгеновских волокон (основа) по оси X, 47% Y-волокон (поперечные нити) и 10% Z-волокон. Облицовочные панели получили следующие габариты: толщина 3,5 мм, до диффузии, и поверхностная плотность $2,08 \text{ кг/м}^2$. Структуры трехмерного плетения сетки и лицевой панели были выбраны с целью повышения устойчивости к расслоению.

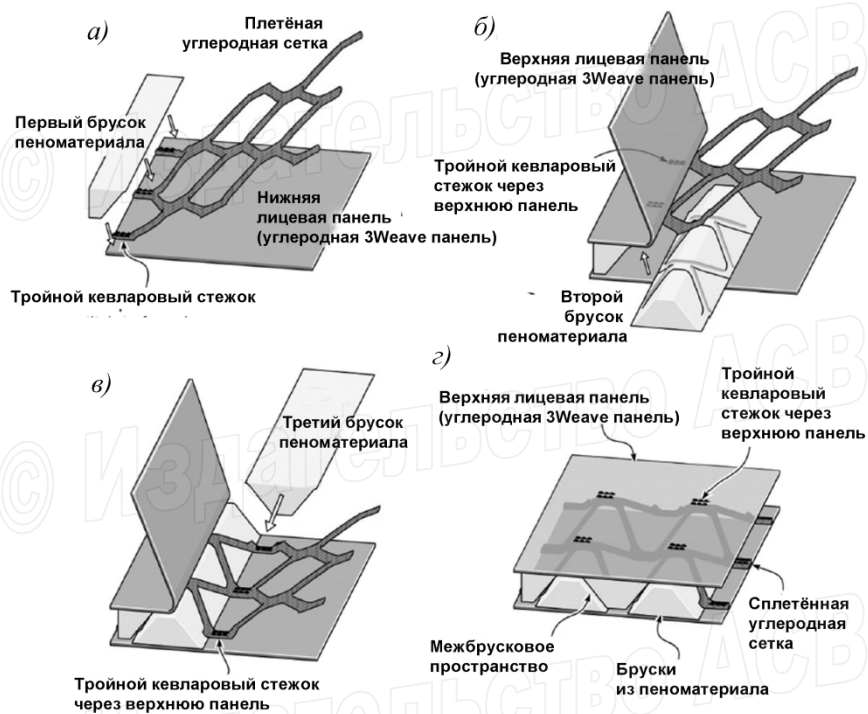


Рис. 4.4. Пошаговая сборка сэндвич-панели из углеродного волокна.

4.2.4. Пропитка сэндвич-панелей

Эпоксидная смола с отвердителем используется для полимеризации матрицы. Смола должна обладать низкой вязкостью, что позволит полностью пропитать панель сложной конфигурации в процессе диффузии, умеренно высокой прочностью и ударостойкостью.

Эпоксидная смола может иметь предел прочности при сжатии 75 МПа и модуль Юнга $E_{\text{смолы}} = 1,85 \text{ ГПа}$. Использован метод вакуумного переноса смолы (англ. аббревиатура VaRTM), чтобы пропитать скомпонованные переплетения углеродного волокна. Схема устройства перед началом пропитки показана на рис. 4.5.

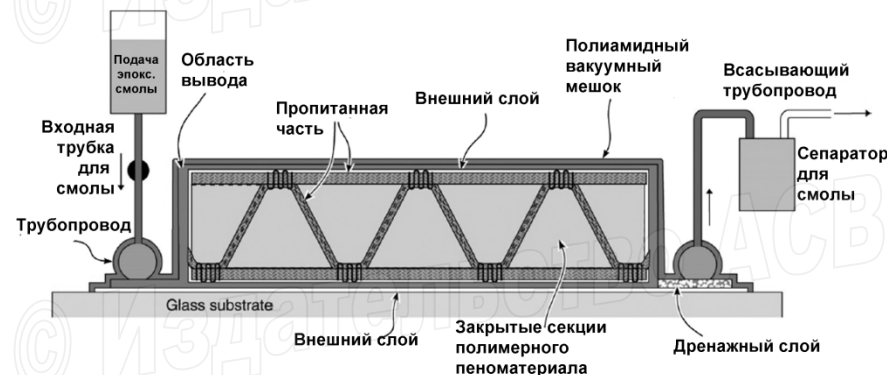


Рис. 4.5. Схема процесса пропитки методом вакуумного переноса смолы

Циклы пропитки и отверждения проводились в автоклаве, что позволило контролировать температуру и давление в системе в течение всего процесса. Образцы пропитывались на покрытой воском стеклянной поверхности для возможности извлечения панели по окончании процесса. Поверхность покрывалась коркой и дренажным слоем, которая появляется при вакуумировании ламината из композиционных материалов. Панель из углеродного волокна затем помещали поверх образовавшегося внешнего слоя. Второй внешний слой был использован для формирования панели сверху, а распределительный слой наполнителя обеспечил равномерный поток смолы. Дренажный слой был помещен в область вывода, и, наконец, полиамидный вакуумный мешок был использован, чтобы отгородить и полностью изолировать образец. Трубки ввода и вывода также установили в вакуумный мешок. Отверстие выходной трубы соединено с сепаратором для смолы и позволяет отдельно выводить вещества из автоклава. Входная трубка была соединена с контейнером смолы.

Панели были пропитаны эпоксидным отвердителем с коэффициентом 100:22. Составляющие вакуумных мешков помещались в автоклав, с помощью выходной трубки откачивали воздух до давления $P_v = -3,6 \text{ КПа}$ и происходила подача смолы через входную трубку. Затем входной трубопровод был открыт, а смола стекала по детали и начинала вытекать через выходную трубку. Выходной трубопровод затем перекрывали, и в автоклаве происходил процесс отверждения.

Сначала образец находился под внешним давлением до 0,1 МПа и сохранялось внутреннее давление вакуума. Далее вакуумный трубопровод был отрегулирован до атмосферного давления, а внешнее давление увеличилось до 0,17 МПа, чтобы устранить дренаж из смолы. Образец затем нагревали до 71 °С, а давление и температура поддерживались в течение 4-часового периода отверждения.

После отверждения панели были извлечены из оснастки и подвержены механической обработке до соответствующих размеров, необходимых для тестирования. Каждая испытываемая панель для сжатия состоит из четырех элементарных ячеек, т.е. массив 2×2 элементарных ячеек. Испытуемые панели для сдвига состоят из 6 элементарных ячеек в длину и двух элементарных ячеек в ширину. Пеноматериал механически удаляется из некоторых образцов, чтобы удостовериться, что механические свойства решетки удовлетворяют требованиям. Отметим, что небольшие зазоры между призматическими брусками пеноматериала – это результат тонких слоев смолы, удерживаемых в комбинированном сердечнике панели. На рис. 4.6 показана фотография готового комбинированного сердечника панели, а также рентгеновская компьютерная томография (Х-КТ), где отчетливо виден волнистый слой оставшейся смолы. Х-КТ характеристика также показала, что фермы имеют эллиптическое поперечное сечение.

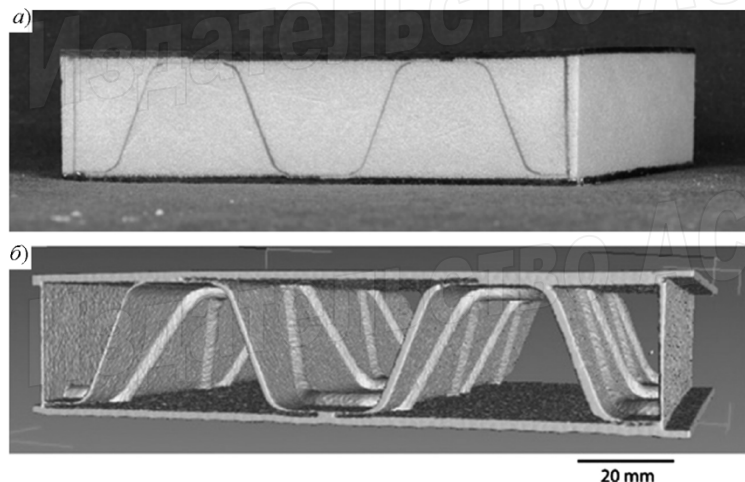


Рис. 4.6. а – фотография готовой комбинированной панели с пирамидальной сеткой из армированного углеродного волокна (CFRP); б – сердечник из пеноматериала Эритрен (бутадиен) H250

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описаны материалы и технология изготовления сотовых конструкций из ПКМ.

Конструкции с сотовыми заполнителями, одними из самых первых композиционных материалов, получившим широкое признание и применение. Практически для всех видов гражданских самолетов и вертолетов, а также военных летательных аппаратов и ракет используются конструкции с сотовым заполнителем из ПКМ.

Повышенная устойчивость сотовых конструкций при сжатии и сдвиге позволяет конструировать их без подкрепляющего продольного набора стрингеров.

Панели с сотовым заполнителем, обладая высокой устойчивостью, позволяют применять несущие обшивки малой толщины (0,3–0,6 мм), что очень важно для снижения массы конструкции.

В первом разделе работы рассмотрена структура сотовой конструкции, формы ячеек, а также даны классификация и способы применения сотовых конструкций из ПКМ.

Следует отметить, что при конструировании конструкций с сотовым заполнителем необходимо учитывать, что чем меньше длина стороны ячейки сотового заполнителя, тем больше плотность, а, следовательно, и прочность заполнителя.

Повышение прочностных характеристик сот может быть осуществлено за счет увеличения толщины стенки ячейки при сохранении ее формы и размеров. Для этого используются бумаги большей толщины. При этом, естественно, увеличивается плотность сот. Так, при замене бумаги БФСК толщиной 60 мкм на бумагу толщиной 145 мкм прочность при сжатии сотового заполнителя с длиной стороны ячеек 2,5 мм повышается с 1,1 до 4,5 МПа, а плотность с 45 до 100 кг/м³.

Во втором разделе рассмотрены материалы, применяемые для изготовления сотовых конструкций из ПКМ. Это материалы для изготовления обшивок, сотовых заполнителей и клеи используемые для склеивания сотовых конструкций.

После алюминиевых сотовых конструкций конструкции на основе арамидных бумаг занимают в самолетостроении второе место.

Сотовые заполнители на основе бумаг имеют ряд преимуществ перед заполнителями из стеклотканей: более высокий ресурс работы и прочностные характеристики в составе сотовых конструкций; возможность изготовления заполнителей с ячейками малых размеров, а также относительно высокие прочность и жесткость; устойчивость к многократным изгибам; негорючесть; грибостойкость; термостойкость; радиопрозрачность; химическая стойкость.

Сотовые наполнители на основе стеклотканей имеют ряд существенных преимуществ, обусловленных физико-механическими характеристиками стеклянных тканей. Способность работать при повышенных температурах, высокие диэлектрические характеристики, высокое сопротивление коррозии, лучшие характеристики по усталостной прочности при действии акустических нагрузок, хорошая совместимость со многими связующими, достаточно высокие прочностные характеристики в сочетании с низкой стоимостью позволяют эффективно их применять при изготовлении теплозащитных обшивок, панелей шумоглушения, обтекателей и т.д.

В третьем разделе рассмотрена технология изготовления сотовых конструкций из ПКМ.

Технология изготовления сотовых конструкций состоит из множества этапов. На первом этапе материалы и полуфабрикаты, применяемые при изготовлении сотовых конструкций, должны быть проверены по показателям качества. На втором этапе изготавливают обшивки. Обшивки получают несколькими способами либо предварительно в виде заготовок с не полностью отвержденным связующим, либо путем выкладки или намотки при сборке и склеивании сотовых конструкций. Применение препрегов в качестве обшивок увеличивает технологический цикл, но в то же время способствует повышению качества.

На следующем этапе изготавливают сотовый наполнитель. Его изготавливают на основе полимерных бумаг и на основе стеклоткани. На основе бумаг изготавливают методом профилирования и методом растяжения. На основе стеклоткани сотовый наполнитель изготавливают методом растяжения и методом объемного ткачества. Применение того или иного метода обусловлено конструктивными особенностями сотовой конструкции.

На заключительном этапе производят сборку и склеивание сотовых конструкций с окончательным контролем качества. В зависимости от характера выполнения технологический процесс сборки имеет свои особенности.

В четвертом разделе изложен процесс по производству сэндвич-панелей из углепластика, представленны фотоматериал и рентгеновская компьютерная томография в сочетании с трёхмерным моделированием микромеханических объектов, а также описаны механические свойства и достоинства сердечника сэндвич-панели.

Кроме того, были сделаны следующие выводы:

1. Пирамидальная структура сетки из углепластика может быть произведена на основе переплетения углеродных нитей IM7 с встав-

ками из полимерных пеноматериалов и с использованием метода вакуумного переноса смолы с отвердителем.

2. Сердечник и лицевые панели могут быть надёжно скреплены в узлах стежками нитей.

3. Прочность и эластичность комбинированного сердечника обеспечиваются увеличением плотности пеноматериала из-за того, что увеличение прочности и эластичности пеноматериала способствует сохранению круглого поперечного сечения ферменной конструкции, которая уменьшает чувствительность к упругому изгибу.

4. Несмотря на то что принцип построения структур из пеноматериала и решетки из углепластика дает высокую степень прочности и эластичности получаемых образцов, не стоит забывать, что эти свойства, а также связанные с ними характеристики веса, объёма во многом зависят от выбранного для производства материала.

Литература

1. Боголюбов В.С., Борох Г.Р., Братухин А.Г. и др. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении. – М.: Готика, 2003. – 516 с.
2. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн. 2. Под редакцией Дж. Любина. М: Машиностроение, 1988. – 584 с.
3. Халиулин В.И., Шапаев И.И. Технология производства композитных изделий: Учеб. пособие. – Казань: Казанский государственный технический университет, 2003. – 332 с.
4. Evans A.G., Hutchinson J.W., Ashby M.F. Multifunctionality of cellular metal systems. *Prog Mater Sci* 1999; 43(3):171–221.
5. Lestari W., Qiao P. Damage detection of fiber-reinforced polymer honeycomb sandwich beams. *J Compos Struct* 2005; 67:365–73.
6. Bitzer T. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. Kluwer Academic Pub; 1997.
7. Steeves C.A., Fleck N.A.. Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: analytical models and minimum weight design. *Int J Mech Sci* 2004; 46(4):561–83.
8. Huang J., Gibson L. Creep of sandwich beams with polymer foam cores. *J Mater Civ Eng* 1990; 2(3):171–82.
9. Ashby M.F. Metal foams: a design guide. Elsevier; 2000.
10. Gibson L.J. Mechanical behavior of metallic foams. *Annu Rev Mater Sci* 2000; 30(1):191–227.
11. Gibson L.J., Ashby M.F. Cellular solids structure and properties. Cambridge University Press; 1999.
12. Li Q.M., Magkiriadis I., Harrigan J.J. Compressive strain at the onset of densification of cellular solids. *J Cell Plast* 2006; 42:371–91.
13. Evans A.G., Hutchinson J.W., Fleck N.A., Ashby M.F., Wadley H.N.G. The topological design of multifunctional cellular metals. *Prog Mater Sci* 2001; 46:309–27.
14. Queheillalt D.T., Wadley H.N.G. Titanium alloy lattice truss structures. *Mater Des* 2009; 30:1966–75.
15. Kooistra G.W., Deshpande V.S., Wadley H.N.G. Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminum. *Acta Mater* 2004; 52:4229–337.
16. Wadley H.N.G. Multifunctional periodic cellular metals. *Trans Royal Soc A* 2006; 364(1838):31–68.
17. Ashby M.F. The properties of foams and lattices. *Philos Trans Royal Soc A* 2006; 364(1838):15–30.
18. Deshpande V.S., Fleck N.A. Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending. *Int J Solids Struct* 2001; 38:6275–305.
19. Queheillalt D.T., Murty Y., Wadley H.N.G. Mechanical properties of an extruded pyramidal lattice truss sandwich structure. *Scripta Mater* 2008; 58:76–9.
20. Moongkhamklang P., Elzey D.M., Wadley H.N.G. Titanium matrix composite lattice structures. *Composites: Part A* 2008; 39:176–87.
21. Moongkhamklang P., Deshpande V.S., Wadley H.N.G. The compressive and shear response of titanium matrix composite lattice structures. *Acta Mater* 2010; 58:2822–35.
22. Russell B.P., Deshpande V.S., Wadley H.N.G. Quasistatic deformation and failure modes of composite square honeycombs. *J Mech Mater Struct* 2008; 3:1315–40.
23. Wang B., Wu L., Ma L., Sun Y., Du S.. Mechanical behavior of the sandwich structures with carbon fiber-reinforced pyramidal lattice truss core. *Mater Des* 2010; 31:2659–63.
24. Xiong J., Ma L., Wu L., Wang B., Vaziri A. Fabrication and crushing behavior of low density carbon fiber composite pyramidal truss structures. *Compos Struct* 2010; 92:2695–702.
25. Xiong J., Ma L., Wu L., Liu L., Vaziri A. Mechanical behavior and failure of composite pyramidal truss core sandwich columns. *Composites: Part B* 2011; 42:938–45.
26. Finnegan K., Kooistra G., Wadley H.N.G. The compressive response of carbon fiber composite pyramidal truss sandwich cores. *Int J Mater Res* 2007; 98:1264–72.
27. George T, Deshpande VS, Wadley HNG. Mechanical response of carbon fiber composite sandwich panels with pyramidal truss cores. *Composites: Part A* 2013; 47:31–40.
28. Grassi M., Zhang X., Meo M. Prediction of stiffness and stresses in z-fibre reinforced composite laminates. *Compos A Appl Sci Manuf* 2002; 33(12):1653–64.
29. Okutan B., Aslan Z., Karakuzu R. A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-loaded woven-glass-fiber reinforced epoxy laminate. *Compos Sci Technol* 2001; 61(10):1491–7.
30. Ko F.K.. Preform architecture for ceramic-matrix composites. *Am Ceram Soc Bull* 1989; 68(2):401–14.
31. Ko FK. Engineered materials handbook, vol. 1. Metals Park, Ohio: ASM International; 1987.
32. Bogdanovich A., Mungalov D. Recent Advancements in Manufacturing 3-D Braided Preforms and Composites. In: *Proc of intconf ACUN-4*; 2002. p. 61–72.
33. Mungalov D., Bogdanovich A. Complex shape 3-D braided composite preforms: structural shapes for marine and aerospace. *SAMPE J* 2004; 40(3):7–20.
34. Kostar T.D., Chou T-W. In: Miravete, A. (Ed.), *Braided structures, 3-D textile reinforcements in composite materials*. Cambridge, England: Woodhead Publ. Ltd.
35. Mungalov D, Bogdanovich A. Automated 3-D braiding machine and method, United States Patent No. 6439096, Issued August 2002.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ	4
2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ.....	11
2.1. МАТЕРИАЛЫ ОБШИВОК ДЛЯ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ	11
2.2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОТОВЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ИЗ ПКМ.....	12
2.2.1. Сотовый наполнитель на основе полимерной бумаги.....	12
2.2.2. Сотовые наполнители на основе стеклотканей	17
2.3. Клеи для склеивания сотовых конструкций.....	18
3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ	20
3.1. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБШИВОК	21
3.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ	22
3.2.1. Изготовление сотовых наполнителей на основе полимерных бумаг	22
3.2.2. Изготовление сотовых наполнителей на основе стеклоткани.....	24
3.2.3. Изготовление сотовых наполнителей переменной высоты.....	28
3.3. СБОРКА И СКЛЕИВАНИЕ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ	31
3.3.1. Предварительная сборка и разборка соединений	33
3.3.2. Подготовка под склеивание обшивок и сотовых наполнителей	35
3.3.3. Нанесение клея на склеиваемые поверхности.....	36
3.3.4. Склеивание и формование сотовых конструкций.....	37
3.4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С КРИВОЛИНЕЙНОЙ ОГИБАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	38

3.5. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ ПКМ.....	40
3.6. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	43
4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЁХСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА.....	45
4.1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРЁХСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА	45
4.2. ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЮ ТРЁХСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА.....	49
4.2.1. Разработка схемы сэндвич-панелей	49
4.2.2. Плетение эластичной сетки.....	51
4.2.3. Сухой монтаж сэндвич-панелей	54
4.2.4. Пропитка сэндвич-панелей	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	58
ЛИТЕРАТУРА.....	61