

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ (Обзор)

Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО, Л. В. ПЕТРУШИНЕЦ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Трехслойные панели с периодическим ячеистым наполнителем из алюминиевых сплавов являются перспективными для применения в изделиях аэрокосмической техники, наземном и водном транспорте. Уникальность конструкции трехслойных панелей заключается в том, что при относительно небольшой массе они характеризуются высокими значениями прочности и жесткости. В работе рассмотрены основные типы трехслойных панелей, конструктивные особенности изготовления наполнителей, методы соединения полос сотового наполнителя между собой, а также элементов трехслойной панели в единую конструкцию. Целью представленного обзора является анализ современных способов получения трехслойных панелей из сплавов алюминия. Анализ литературных данных показал, что наиболее широкое распространение получили такие способы соединения элементов трехслойных панелей, как склеивание и пайка. Однако основными их недостатками является увеличение массы конструкции за счет применения клея или припоя. Для сварки трехслойных панелей перспективно применение диффузионной сварки при изготовлении сотового наполнителя из более прочного титанового сплава или применение специализированной оснастки, позволяющей ограничить степень пластической деформации конструкции. Библиогр. 28, табл. 1, рис. 9.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, трехслойные панели, наполнитель, склеивание, пайка, сварка

Трехслойные панели нашли широкое распространение в самолето-, судостроении, строительстве и других отраслях промышленности вследствие своих уникальных свойств, а именно при относительно небольшой массе эти конструкции характеризуются высокими значениями прочности и жесткости, кроме того они имеют хорошие вибрационные и радиотехнические характеристики, звуко- и теплоизоляционные свойства.

Под термином «трехслойная панель» следует понимать конструкцию, состоящую из двух тонких обшивок (несущих слоев) с помещенным между ними наполнителем (рис. 1) [1].

Уникальность трехслойных панелей заключается в том, что обшивки, усиленные наполнителем, воспринимают высокие напряжения сжатия, превышающие предел упругости материала. В результате разнесения несущих слоев на некоторое расстояние друг от друга, за счет применения наполнителя, достигается значительное отношение жесткости конструкции к ее массе.

Наполнитель, применяемый в трехслойных панелях, можно разбить на следующие группы:

- сплошной из однородного материала;
- сплошной из анизотропного материала;
- облегченный (перфорированный);
- ребристые конструкции.

Разработаны также конструкции трехслойных панелей с гофрированным (рис. 2) и сотовым наполнителями (рис. 3).

Одной из основных характеристик наполнителя является его плотность. Плотность наполнителя

определяется массой материала и объемом, который он занимает между несущими слоями. Плотность наполнителя влияет на массу трехслойной конструкции, на величину прочности и жесткости наполнителя.

В случае применения сотового наполнителя из металла его плотность зависит от формы ячейки, ширины стенки (границы) и ее толщины, плотности материала, из которого сделан наполнитель и метода изготовления наполнителя [2]:

$$\rho_o = k_b(\delta_c/a_c)\rho_m,$$

где k_b — коэффициент, учитывающий формообразование ячейки; δ_c — толщина стенки одинарной грани ячейки; a_c — ширина стенки соты; ρ_m — плотность материала наполнителя.

Плотность сотового наполнителя с шестигранной ячейкой при условии, что $a_c = \delta_c$, $\beta = 60^\circ$ можно определить по формуле

$$\rho_o = 1,54(\delta_c/a_c)\rho_m.$$

Трехслойные панели, особенно с сотовым наполнителем, используются в конструкциях космических аппаратов, а также в самолетах различных

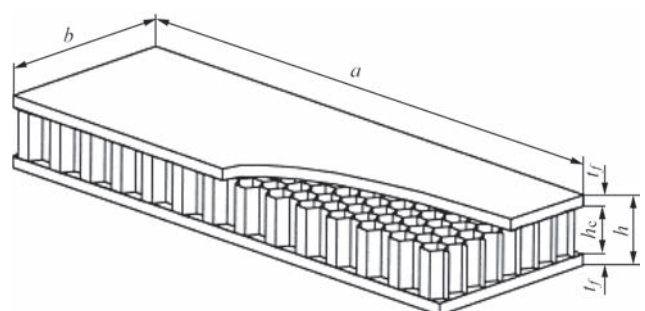


Рис. 1. Схема трехслойной сотовой панели [1]

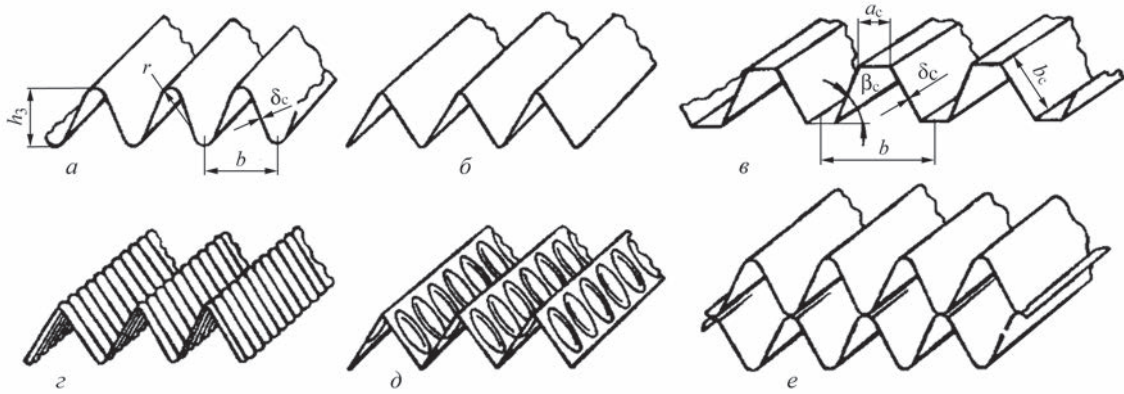


Рис. 2. Примеры конструкций с гофрированным заполнителем: а — синусоидальный; б — треугольный; в — трапециевидный; г — волнистая ферма; д — рифтовая ферма; е — двойная ферма [2]

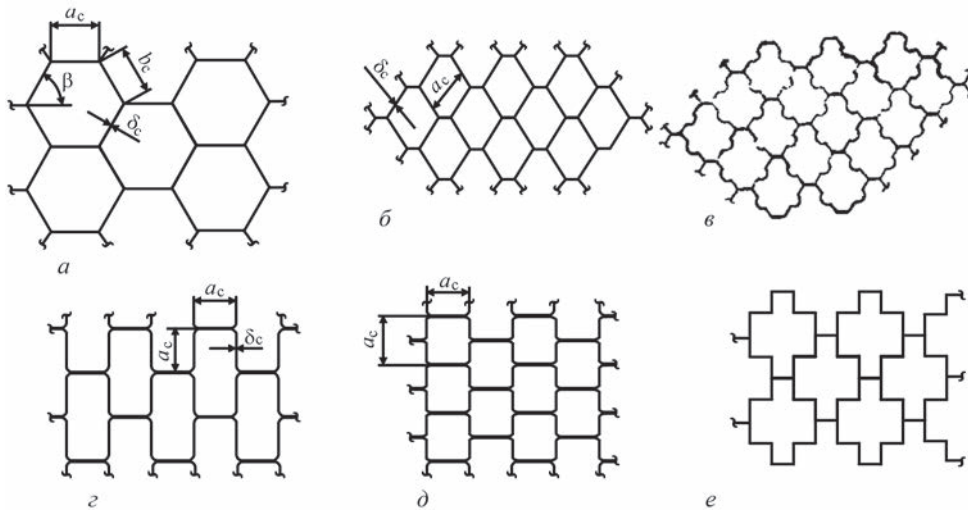


Рис. 3. Примеры конструкций сотового заполнителя: а — с шестигранной ячейкой; б — с квадратной ячейкой; в — с квадратной рифтованной ячейкой; г, д — прямоугольной ячейкой; е — крестообразной ячейкой [2]

классов и назначения. Подобные конструкции могут применяться в качестве силовых элементов в крыле, фюзеляже, особенно в агрегатах, воспринимающих местную нагрузку (закрылки, обтекатели) и поперечную распределенную нагрузку (полы), а также в качестве несилевых элементов [2, 3]. Использование во внутреннем слое обтекателя высокоскоростного поезда сотовых структур из алюминиевых сплавов перспективно в качестве элемента, поглощающего при лобовом столкновении значительное количество энергии [4].

Способность заполнителя воспринимать нагрузку в направлении нагружения несущих слоев зависит от расположения его волокон или стенок. Если последние расположены перпендикулярно к этому направлению, то заполнитель нагрузку не воспринимает; если же параллельно, то заполнитель нагружается. В настоящее время для трехслойных панелей из легких сплавов в большинстве случаев применяют сотовые заполнители, имеющие следующие преимущества: стенки сот расположены перпендикулярно к несущим слоям, поэтому заполнитель не воспринимает нагрузку от обшивки и вследствие этого не выпучивается

при возрастании нагрузки. Несущие слои подкрепляются стенками сот как бы «сплошным» образом (отношение размера соты к толщине несущего слоя ≤ 25), так что напряжение выпучивания несущих слоев между стенками сот лежит в пластической области [5]. Подтверждением этому служат высокие разрушающие напряжения сотовых конструкций при сжатии (рис. 4) [6].

Несмотря на большое количество разработанных к настоящему времени конструкций сотовых заполнителей массовое производство во всем мире освоено только для сотового заполнителя с гладкими шестигранными ячейками. Объемы его выпуска намного превосходят объемы производства остальных конструкций сотовых заполнителей вместе взятых. Это объясняется хорошими эксплуатационными характеристиками, простотой изготовления и относительно дешевым технологическим оборудованием для производства заполнителя с таким типом ячеек [7].

Сотовый заполнитель (рис. 5) [8] образуется из гофрированных полос материала, соединенных между собой по наружным плоскостям гофров. Каждый гофр имеет конфигурацию половины ше-

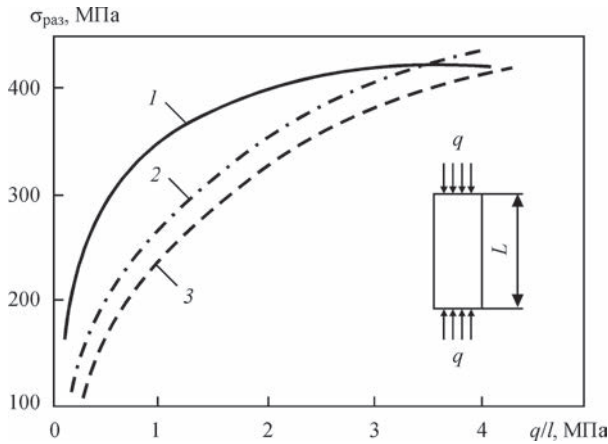


Рис. 4. Зависимость напряжения разрушения при продольном сжатии от коэффициента напряженности для различных конструкций трехслойных панелей: 1 — панель с сотовым наполнителем; 2 — панель монолитная; 3 — панель стрингерная клепаная [6]

стигранника и образует половину сотовой ячейки. Соединенные между собой гофрированные полосы образуют ряды ячеек шестигранной формы. В каждой ячейке имеется четыре грани одинарной толщины (исходной толщины материала сотового наполнителя) и две грани двойной толщины [2].

Сотовый наполнитель может быть изготовлен из широкого ряда алюминиевых сплавов. Так, сплав 3003 зачастую используется для изготовления сот коммерческого класса, сплавы 5052, 5056 и 2024 применяют в специфических конструкциях. Сплав 2024 используется при повышенной температуре эксплуатации (до 216 °С), в то время

как наполнители из других алюминиевых сплавов могут работать только до 177 °С.

Основные методы получения сотового наполнителя: склеивание, контактная сварка, пайка и диффузионная сварка. Наиболее распространенным способом изготовления является склеивание (около 95 % всего объема производства трехслойных панелей). В связи с большой себестоимостью процесса контактную сварку, пайку и диффузионную сварку используют при производстве наполнителей, работающих при высоких температурах или в агрессивных средах [3].

Существует два основных метода, применяемых для преобразования листового материала в сотовый: растяжение пакета и изготовление из профилированных лент.

Метод растяжения пакета применим для изготовления сотовых наполнителей, ячейки которых составлены только из шести граней. Толщины металлических материалов могут составлять не более 80 мкм. При этом более благоприятные условия для растяжения пакетов создаются с увеличением стороны ячейки и уменьшением толщины исходного материала, а также высоты ячейки сотового наполнителя. Соединение листового материала выполняется методом склеивания. Схема реализации метода представлена на рис. 6. С целью снижения массы сотового наполнителя в большинстве случаев клеевые полосы наносятся на материал с одной стороны листа. Далее листовый материал нарезается на мерные длины с по-

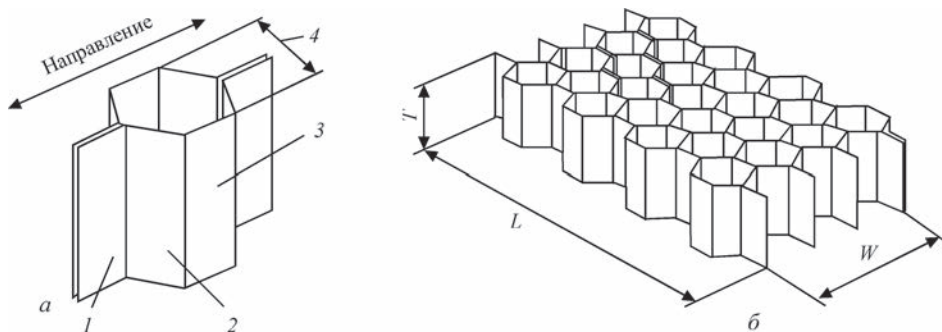


Рис. 5. Сотовый наполнитель с шестигранной формой ячеек: а — вид единичной ячейки (1 — гофрированные полосы; 2 — грани ячейки одинарной толщины; 3 — грани ячейки двойной толщины; 4 — размер ячейки); б — основные параметры сотового наполнителя (L — длина, T — толщина, W — ширина) [8]

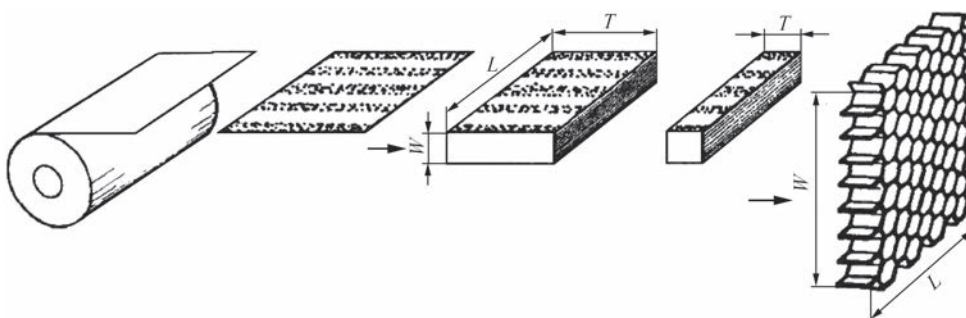


Рис. 6. Процесс изготовления сотового наполнителя методом растяжения пакета [3]

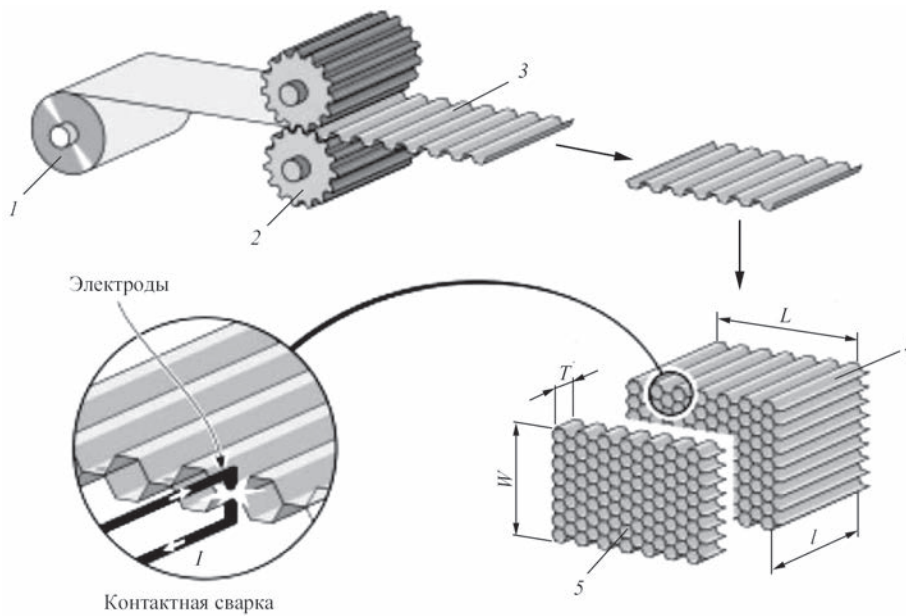


Рис. 7. Процесс изготовления сотового заполнителя из профилированных лент [9]: 1 — рулон фольги; 2 — формирующие ролики; 3 — гофрированная фольга; 4 — пакет сотовых заполнителей; 5 — сотовый заполнитель

следующей сборкой пакетов сотовых заполнителей и их склеиванием.

Растяжение сотового пакета или заготовки производится на специальной установке. При приложении усилий к участкам внешних листов пакета, которые расположены на месте граней будущих сотовых ячеек, пакет будет растягиваться вследствие изгиба несклеенных участков его листов. При определенной степени растяжения образуются ячейки шестигранной формы, а при дальнейшем растяжении образуются прямоугольные ячейки.

Процесс получения сотового заполнителя из профилированных лент схематически представлен на рис. 7 [9]. Сотовые заполнители, изготовленные данным методом, имеют более правильную геометрию ячеек, чем заполнители, получаемые путем растяжения пакетов.

После гофрирования на соответствующие поверхности листов наносится клей, затем они укладываются один на другой и выполняется отверждение в печи. Вместо склеивания также может быть использована пайка, диффузионная или контактная сварка. Данные методы соединения позволяют значительно повысить температуру эксплуатации сотовой конструкции, например, для нержавеющей стали и инконеля до 700 °С [3].

В трехслойных панелях соединение несущих слоев с заполнителем осуществляется различными технологическими процессами: склеиванием, пайкой и сваркой. При этом склеивание элементов конструкции занимает ведущее место.

Получение трехслойных сотовых панелей методом склеивания. По данным [10] клеи нашли широкое практическое применение в изделиях авиационной техники. Пленочные и пастообразные клеи конструкционного назначения имеют широкий диапазон прочностных и деформационных свойств. Клеи предназначены для изготовления сотовых и слоистых силовых конструкций из металлов и полимерных композиционных материалов. Клеевые соединения имеют высокую длительную прочность, вибростойкость, стойкость против образования трещин, воздействия климатических факторов и агрессивных сред. В таблице представлены характеристики пленочных клеев конструкционного назначения.

Специфика получения трехслойных панелей методом склеивания заключается в использовании промежуточных материалов — препрегов, которые представляют собой листы тканых или нетканых волокнистых материалов, пропитанных неотвержденными полимерными связующими.

В работе [11] оценивали влияние подготовки поверхности сот на склеивание заполнителя с обшив-

Характеристики пленочных клеев конструкционного назначения [10]

Клей	Интервал рабочих температур, °С	Прочностные характеристики					
		τ_v , МПа	σ_v , МПа	$S_{рассл}$, Н/мм	γ , %	$\sigma_{д.п.}$ МПа (время – 500 ч)	τ_{max} при $N = 10^7$ циклов, МПа
ВК-25	-60...200	27	22	5...6	140...200	18,5	9
ВК-36	-130...160	37 ± 2,5	50	2...3	80...100	34	8
ВК-50	-60...150	25 ± 5	25 ± 5	10	135...150	17	10
ВК-51	-60...80	40 ± 2,5	–	3	70...120	32,4	9
ВК-51А	-69...80	37,5 ± 2,5	–	3	40	22,4	9

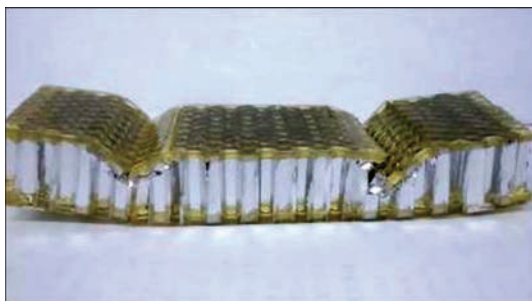


Рис. 8. Вид образца после испытания на сжатие [14]

кой, а также природы органических растворителей. Отмечается, что для получения надежного соединения смола должна вытекать из препрега (или клеящего вещества) и создавать симметричные галтели между наружным листом обшивки и стенками сот. При этом край заполнителя должен быть прямым и острым. Он должен слегка отступать от поверхности обшивки, создавая границу раздела между препрегом, смолой и стенкой заполнителя. Как отмечают авторы, применение мокрого шлифования на наждачной бумаге 320 позволяет получить наилучшее качество склеивания. На качество связи также может влиять природа органического растворителя. Агрессивные растворители могут оставлять слой олигомеров на контактных поверхностях, что негативно влияет на прочностные характеристики трехслойной панели.

В работе [12] установлено, что основной причиной выхода из строя панелей, полученных склеиванием, является разрыхление клея под действием нагрузки и его последующее разрушение. Исследования, приведенные в [13], также показывают, что увеличение количества клея до 2,5 раза (с 0,4 до 1,0 кг/м²) не влияет на характер его поведения под нагрузкой и практически не приводит к повышению усталостной прочности трехслойной сотовой панели.

По данным работы [14] при испытании панели на сдвиг (рис. 8) комбинация алюминиевый заполнитель со связкой из слоя эпоксидной смолы не проявляют явления неустойчивости – образец под нагрузкой не претерпевает катастрофических изменений. При увеличении нагрузки из-за жесткости композитного слоя алюминий сотового заполнителя сжимался. Авторы отмечают, что трещины в композитном слое и заполнителе появились после того, как давление прессы стало выше предела текучести алюминиевого заполнителя, что привело к падению несущей способности трехслойной панели.

Пайка трехслойных сотовых панелей. Припой для пайки алюминия и его сплавов можно применять в виде проволоки, порошка, пасты, фольги, литых прутков, шайб, плакирующего слоя. Наиболее технологичным способом введения припоя является плакирование им паяемого металла. При этом слой припоя относительно

постоянный, отпадает необходимость закрепления припоя при сборке изделий под пайку, а также введение во флюс хлоридов, содержащих облуживающее вещество, так как припой уже нанесен в местах образования соединений на поверхности паяемых деталей и нет необходимости улучшать его растекаемость.

Чтобы обеспечить получение качественных паяных соединений алюминия и его сплавов, припои должны удовлетворять следующим основным требованиям: температура плавления припоев должна быть ниже температуры плавления сплавов алюминия; расплавленные припои должны хорошо смачивать основной металл и заполнять зазоры между паяемыми деталями; припои должны обеспечивать необходимую прочность и коррозионную стойкость паяных соединений; коэффициенты термического расширения паяемого металла и припоя должны быть примерно одинаковы.

Основные припои, применяемые для пайки алюминия и его сплавов, условно можно разделить на три группы:

припои на основе алюминия, обеспечивающие высокую прочность паяных соединений и высокую коррозионную стойкость, с температурой плавления в интервале 450...630 °С;

припои на основе цинка, характеризующиеся достаточно высокой прочностью и являющиеся относительно коррозионностойкими, с температурой плавления в интервале 300...450 °С;

легкоплавкие припои на основе олова, свинца, кадмия, галлия с температурой плавления ниже 300 °С. Эти припои имеют низкую прочность и коррозионную стойкость. Преимущество этих припоев — низкая температура плавления, а, следовательно, и пайки [15].

При пайке, также как и при склеивании, припой в месте контакта обшивки с сотовым заполнителем должен образовывать симметричные галтели. При этом необходимо отметить, что применение как клея, так и припоя обуславливает увеличение массы трехслойной панели. Другим фактором, ограничивающим использование пайки при соединении элементов трехслойной панели, является взаимодействие припоя с основным металлом в ходе эксплуатации, приводящее к утонению стенок сотового заполнителя и образованию трещин у его основания [16].

Для соединения изделий сложной формы авторы [17] вместо традиционного плакирования припоем системы Al-Si рекомендуют на сопрягаемые поверхности наносить смесь флюса Nocolok с частицами Si, после чего проводить пайку в вакуумной печи.

В работе [18] методом пайки соединяли тетраэдрический решетчатый заполнитель (рис. 9) из

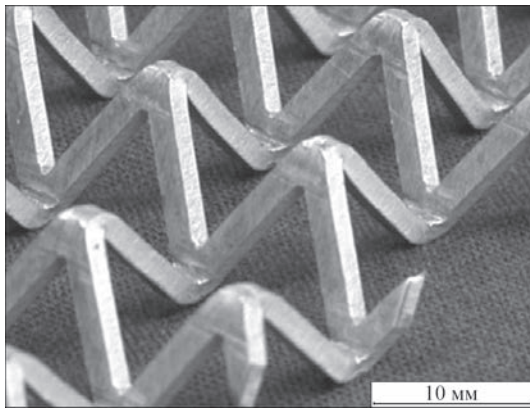


Рис. 9. Заполнитель в виде тетраэдрической решетчатой фермы из сплава 6061 [18]

алюминиевого сплава АА6061 с обшивками из сплава АА6951. На поверхности панелей в качестве припоя наносили сплав АА4343 с содержанием кремния 6,8...8,2 %. Затем сборку покрывали флюсом Handy Flo-X5518 и помещали в муфельную печь. Пайку проводили при температуре 595 ± 5 °С. Продолжительность пайки не превышала 5 ± 1 мин, что позволило снизить негативное влияние диффузии кремния из припоя на прочностные свойства соединений. Последующая термообработка при 500 °С, выдержке на протяжении 30 мин с закалкой в воду и старением при 165 °С на протяжении 1140 мин позволяет увеличить прочность заполнителя до максимальных значений и тем самым повысить прочность на сжатие панели с 9 до 20 МПа.

Авторы работы [19] для соединения трехслойной сотовой панели из алюминиевого сплава 6061 применяли низкотемпературную ультразвуковую пайку припоем Sn–Pb–Zn (Sn–29,2Pb–6Zn–1Ag–0,38Cu–0,42 Вi мас. %). Температура плавления припоя составляла 190,68 °С. Нагрев узла производился со скоростью 15 °С/с при ультразвуковой вибрации 100...980 Вт на частоте 20 кГц. Повышение мощности ультразвука до 980 Вт при одновременном уменьшении монтажного зазора до 0,1 мм позволило получить минимальный угол смачивания припоем. Оптимальным временем пайки является 45 с. После пайки в припое наблюдаются четыре зоны: зона, обогащенная Sn; зона, обогащенная Pb; эвтектическая фаза Sn–Pb и зона, обогащенная Al. Несмотря на относительно низкую температуру процесса, пайка приводит к частичному растворению алюминия в припое.

Способы сварки трехслойных панелей. Лазерная сварка. Для соединения относительно толстых элементов (от 0,5 мм) трехслойных панелей возможно использование лазерной сварки. Данный метод применим для соединения трапециевидного заполнителя с обшивками [20].

Использование этого вида сварки, особенно при соединении тонколистовых элементов, сопряжено с образованием ряда дефектов (поры, выпле-

ски, выпуклости и кратеры), для предотвращения формирования которых необходимо выполнение ряда рекомендаций. Сварку проводят в импульсном режиме. Для предотвращения выплесков авторы [21] указывают на необходимости обеспечить большую поверхность сварочной ванны в начальный период сварки путем плавного увеличения мощности лазера в начале импульса. Избежать появления пустот можно за счет плавного уменьшения мощности, что позволяет задать скорость выхода луча из канала меньше скорости заливания канала расплавом. Предотвращает появление выпуклости и кратера поддержание мощности лазера на уровне, который соответствует порогу возникновения канала.

Диффузионная сварка. При диффузионной сварке алюминия и его сплавов особое место отводится химической обработке поверхностей перед сваркой. Оксидная пленка может удаляться травлением или механическими методами зачистки. Наиболее широко применяемым способом подготовки свариваемых поверхностей алюминия и его сплавов остается химическое травление. Считается целесообразным после очистки от оксидов свариваемые поверхности алюминиевых деталей покрывать смолами, лаками или полимерами на основе стирола, разлагающегося без остатка при нагреве в вакууме.

Сварку алюминия и его сплавов без промежуточных слоев выполняют при температуре 500...600 °С [22].

По данным [23] температура диффузионной сварки в вакууме деформируемых алюминиевых сплавов после механической зачистки соединяемых поверхностей, как правило, ниже температуры нагрева сплава под закалку. Оптимальные параметры сварки сплава АМг5 и АМг6 следующие: $T_{св} = 500$ °С, $P_{св} = 10$ МПа, $t_{св} = 10$ мин, вакуум $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. При этом на микроструктуре сварных соединений, как отмечают авторы, граница раздела между сваренными деталями отсутствует, что свидетельствует о формировании монолитного соединения. Сварка на указанных режимах сплавов не вызывает ухудшения механических свойств, так как отсутствует коагуляция интерметаллидов в зоне соединения, что улучшает механические свойства и повышает пластичность металла.

Разрушить оксидную пленку, активировать процессы диффузионного взаимодействия алюминиевых сплавов и снизить температуру сварки можно, применяя промежуточные прослойки, образующие эвтектики при нагревании с алюминием и другими компонентами сплава [24]. В качестве материалов для прослоек можно использовать медь, магний, цинк в виде фольг или покрытий. В случае прослоек из цинка температура сварки со-

ставляет 480...500 °С, магния 470...490 °С, меди 400...450 °С. Качество соединения в значительной мере зависит от толщины промежуточных прослоек. При толщине более 3 мкм количество эвтектики достаточно велико. За счет деформации эвтектика частично удаляется из зоны соединения. Уменьшение толщины промежуточной прослойки до 1...2 мкм позволяет получить соединения с более высокой прочностью, достигающей 0,85...0,95 % прочности свариваемых деформируемых сплавов.

Более подробно технологические аспекты диффузионной сварки сплавов алюминия рассмотрены в работе [25]. Достаточно прочные соединения из алюминиевых сплавов получали за счет применения тонких промежуточных прослоек из легкоплавких металлов — цинка и галлия. Галлий наносили механическим натиранием в твердом или жидком состоянии. Диффузионную сварку проводили при температуре 420...500 °С. Как утверждают авторы [25] за время изотермической выдержки 240 мин происходит полное растворение галлия в основном материале. Прочность на срез соединений из алюминий-магниевого сплава АМг6 и 01570 через подслоя галлия составляет 180...210 МПа.

Более эффективно применение промежуточной прослойки из меди толщиной 0,8...1,0 мкм. При изотермической выдержке 20...30 мин и температуре диффузионной сварки 500 °С в зоне соединения активно развивается процесс рекристаллизации материала.

Анализируя результаты оже-спектрального анализа авторы приходят к выводу, что на стадии изотермической выдержки в результате взаимной диффузии, на контактной границе, образуется сплав Al–Mg–Cu эвтектического состава. Присутствие жидкой фазы способствует разрушению оксидной пленки.

Эффект сверхпластичности реализуется при сварке сплава 01570. Рекристаллизация зоны соединения сплава происходит при температуре 472...477 °С и активно развивается при наличии в контакте с тонкой промежуточной прослойкой из меди. Прочность при испытании на срез соединения сплава 01570 через промежуточную прослойку меди толщиной 1 мкм достигает 260 МПа, причем, хорошо воспроизводимые значения (± 15 МПа) получаются в случае, если покрытие наносится на обе соединяемые поверхности (по 0,5 мкм).

В работе [26] приведены результаты исследований по диффузионной сварке в вакууме трехслойных панелей с пластинчатым, ячеистым и гофрированным заполнителями, полученными с применением формирующих устройств. Исследования проводи-

лись на сплавах систем Al–Mg, Al–Zn–Mg, Al–Cu–Mg. Толщина листов составляла 2 мм, размер панелей 500×500 мм, строительная высота до 30 мм. Перед сваркой заготовки обезжиривали с последующим химическим травлением в 70 %-й азотной кислоте. Далее на соответствующих поверхностях обшивок и заполнителя проводили ионное травление, после чего напыляли медь (либо механически зачищали металлической щеткой). Диффузионную сварку проводили на режиме: температура сварки 500...510 °С, давление 5...10 МПа, время сварки 30...60 мин. При сварке листовых заготовок во всех трех случаях в зоне соединения формируются общие зерна, в сплаве системы Al–Mg также наблюдаются отдельные несплошности. Последующая термообработка соединений из сплавов систем Al–Zn–Mg и Al–Cu–Mg (закалка + старение) позволяет повысить прочность до уровня близкого к основному материалу. Показана возможность получения качественного соединения алюминиевых сплавов без подслоя меди за счет повышения степени деформации. Максимальную прочность на отрыв имели образцы, в которых деформация металла в зоне соединения составляла 70...90 % (370...420 МПа).

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что перспективным методом соединения обшивок с тонкостенным заполнителем является диффузионная сварка в вакууме, так как при этом процессе отсутствуютотяжеляющее и ослабляющее влияние клея и припоя на работоспособность трехслойной панели. Однако, как было показано выше, при диффузионной сварке алюминиевых сплавов рекомендуемыми параметрами являются температура $T_{св} = 500...600$ °С, удельное давление $P_{св} = 5...10$ МПа. Данные параметры процесса при сварке трехслойных панелей из алюминиевых сплавов не могут быть применены вследствие потери тонкостенным заполнителем устойчивости, что обуславливает необходимость в снижении температуры нагрева и поиска технологических решений, которые позволили бы обеспечить получение неразъемного соединения. Решением возникшей проблемы может быть применение формирующих устройств, которые позволят избежать нелимитированной деформации заполнителя [27], или сварка комбинированных панелей, в которых сотовый заполнитель выполнен из более прочного материала, например, титанового сплава, а обшивки — из алюминиевого [28]. В ходе сварки при соответствующей температуре под давлением ребра из титанового сплава внедряются в алюминиевый и вследствие ползучести алюминий заполняет зазоры между выступами. Данный процесс сопровождается дроблением хрупкой оксидной пленки на

алюминии, способствуя формированию прочного соединения.

Список литературы

- Paik J. K., Thayamballi A. K., Kim G. S. (1999) The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-Walled Structures*, **35**, 205–231.
- Панин В. Ф., Гладков Ю. А. (1991) *Конструкции с заполнителем: Справочник*. Москва, Машиностроение.
- Bitzer T. (1997) *Honeycomb Technology. Materials, Design, Manufacturing, Applications And Testing*. Springer-Science+Business Media Dordrecht.
- Amraei M., Shahravi M., Noori Z. et al. (2013) Application of aluminium honeycomb sandwich panel as an energy absorber of high-speed train nose. *Journal of Composite Materials*, **48**, **9**, 1027–1037.
- Хертель Г. (1965) *Тонкостенные конструкции (конструктивные элементы, определение прочных размеров и конструирование в самолетостроении и других отраслях техники)*. Москва, Машиностроение.
- Сливинский В. И., Ткаченко Г. В., Сливинский М. В. (2005) Эффективность применения сотовых конструкций в летательных аппаратах. *Вестник Сибирского аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*, **4**, 169–173.
- Иванов А.А., Кашин С.М., Семенов В.И. (2000) *Новое поколение сотовых заполнителей для авиационно-космической техники*. Москва, Энергоатомиздат.
- Kindinger J. (2001) Lightweight Structural Cores. *ASM Handbook. Composites, Vol. 21.*, pp. 180–183.
- Haydn N. G. Wadleya, Norman A. Fleckb, Anthony G. Evans. (2003) Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures. *Composites Science and Technology*, **63**, 2331–2343.
- Лукина Н. Ф., Аниховская Л. И., Деметьева Л. А. и др. (2007) Клеи и клеящие материалы для изделий авиационной техники. *Сварочное производство*, **5**, 19–27.
- Khan S., Loken H. Y. (2007) Bonding of sandwich structures – the facesheet/honeycomb interface – a phenomenological study. *Proceedings of SAMPE 2007. Baltimore, June 2007*, pp. 1–9.
- Yi-Ming Jen, Li-Yen Chang (2009) Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams. *Engineering Failure Analysis*, **16**, 1282–1293.
- Yi-Ming Jen, Chih-Wei Ko, Hong-Bin Lin (2009) Effect of the amount of adhesive on the bending fatigue strength of adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich beams. *International Journal of Fatigue*, **31**, 455–462.
- Shuliang Cheng, Xuya Zhao, Yajun Xin et al. (2015) Experimental Study on Shear Property of Integrated Sandwich Panel of Aluminum Honeycomb and Epoxy Resin. *The Open Mechanical Engineering Journal*, **9**, 1000–1006.
- Никитинский А. М. (1983) *Пайка алюминия и его сплавов*. Москва, Машиностроение.
- Sporer D., Fortuna D. (2014) Selecting materials for brazing a honeycomb in turbine engines. *Welding Journal*, **93**, **2**, 44–48.
- Kumagai M. (2003) Recent technological developments in welding of aluminium and its alloys. *Welding International*, **17**, **3**, 173–181.
- Gregory W. Kooistra, Vikram S. Deshpande, Haydn N.G. Wadley. (2004) Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminium. *Acta Materialia*, **52**, 4229–4237.
- Ding Min, Zhang Pei-lei, Zhang Zhen-Yu et al. (2010) A novel assembly technology of aluminum alloy honeycomb structure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **46**, 1253–1258.
- Ferraris S., Volpone L. M. (2005) Aluminum Alloys in Third Millennium Shipbuilding: Materials, Technologies, Perspectives. In: *The Fifth International Forum on Aluminium Ships, Tokyo, Japan, 11–13 October 2005*, pp. 1–11.
- Левин Ю. Ю., Ерофеев В. А. (2008) Расчет параметров импульсной лазерной сварки алюминиевых сплавов малой толщины. *Сварочное производство*, **4**, 20–24.
- Бачин В. А., Квасницкий В. Ф., Котельников Д. И. и др. (1991) *Теория, технология и оборудование диффузионной сварки*. Москва, Машиностроение.
- Козаков Н. Ф. (1968) *Диффузионная сварка в вакууме*. Москва, Машиностроение.
- Гуревич С. М. (1990) *Справочник по сварке*. Киев, Наукова думка.
- Сергеев А. В. (1990) Диффузионная сварка алюминиевых сплавов. *Достижения и перспективы развития диффузионной сварки*. Москва, Знание, с. 48–54.
- Чудин В. Н., Тимохов А. П., Терентьев М. М. и др. (1992) Диффузионная сварка пустотелых конструкций из листовых высокопрочных алюминиевых сплавов. *Сварочное производство*, **10**, 5–7.
- Фальченко Ю. В., Устинов А. И., Петрушинец Л. В. та ін. (2017) *Пристрій для дифузійного зварювання тришарових стільникових панелей*. Україна, Пат. 113424. В23К 20/00, В23К 20/14.
- Башурин А. В., Мастихин Е. Ю., Колмыков В. И. (2010) Диффузионная сварка пустотелых биметаллических панелей. *Заготовительные производства в машиностроении*, **1**, 13–15.

References

- Paik, J.K., Thaymballi, A.K., Kim, G.S. (1999) The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-Walled Structures*, **35**, 205–231.
- Panin, V.F., Gladkov, Yu.A. (1991) *Structures with filler material: Refer. book*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Bitzer, T. (1997) *Honeycomb technology. Materials, design, manufacturing, applications and testing*. Springer-Science+Business Media Dordrecht.
- Amraei, M., Shahravi, M., Noori, Z. et al. (2013) Application of aluminium honeycomb sandwich panel as an energy absorber of high-speed train nose. *J. of Composite Materials*, **48**(**9**), 1027–1037.
- Khertel G. (1965) *Thin-walled structures (structural elements, determination of accurate sizes and design in aircraft construction and other engineering fields)*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Slivinsky, V.I., Tkachenko, G.V., Slivinsky, M.V. (2005) Efficiency of application of honeycomb structures in aircrafts. *Vestnik Sib. Aerokosmich. Un-ta im. Akad. M.F. Reshetnyova*, **4**, 169–173 [in Russian].
- Ivanov, A.A., Kashin, S.M., Semenov, V.I. (2000) *New generation of honeycomb filler materials for aerospace engineering*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
- Kindinger, J. (2001) Lightweight structural cores. *ASM Handbook, Vol. 21: Composites*, **3**, 180–183.
- Haydn N.G. Wadleya, Norman, A. Fleckb, Anthony G. Evans (2003) Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures. *Composite Sci. and Technology*, **63**, 2331–2343.
- Lukina, N.F., Anikhovskaya, L.I., Dementieva, L.A. et al. (2007) Adhesives and adhesive materials for items of aircraft engineering. *Svarochn. Proizvodstvo*, **5**, 19–27 [in Russian].
- Khan, S., Loken H.Y. (2007) Bonding of sandwich structures – the facesheet/honeycomb interface – a phenomenological study. In: *Proc. of SAMPE 2007 (Baltimore, June 2007)*, 1–9.
- Yi-Ming Jen, Li-Yen Chang (2009) Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams. *Engineering Failure Analysis*, **16**, 1282–1293.
- Yi-Ming Jen, Chin-Wei Ko, Hong-Bin Lin (2009) Effect of the amount of adhesive on the bending fatigue strength of adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich beams. *Int. J. of Fatigue*, **31**, 455–462.
- Shuliang Cheng, Xuya Zhao, Yajun Xin et al. (2015) Experimental study on shear property of integrated sandwich

- panel of aluminum honeycomb and Epoxy Resin. *The Open Mechanical Engin. J.*, **9**, 1000-1006.
15. Nikitinsky, A.M. (1983) *Brazing of aluminium and its alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 16. Sporer, D., Fortuna, D. (2014) Selecting materials for brazing a honeycomb in turbine engines. *Welding J.*, **93**(2), 44-48.
 17. Kumagai, M. (2003) Recent technological developments in welding of aluminium and its alloys. *Welding Int.*, **17**(3), 173-181.
 18. Gregory, W. Kooistra, Vikram, S. Deshpande, Haydn N.G. Wadley (2004) Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminium. *Acta Materialia*, **52**, 4229-4237.
 19. Ding Min, Zhang Pei-lei, Zhang Zhen-Yu et al. (2010) A novel assembly technology of aluminum alloy honeycomb structure. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **46**, 1253-1258.
 20. Ferraris, S., Volpone, L.M. (2005) Aluminum alloys in third millennium shipbuilding: Materials, technologies, perspectives. In: *Proc. of 5th Int. Forum on Aluminium Ships (Tokyo, Japan, 11-13 October 2005)*, 1-11.
 21. Levin, Yu. Yu., Erofeev, V.A. (2008) Calculation of parameters of pulsed laser welding of small thickness aluminium alloys. *Svarochn. Proizvodstvo*, **4**, 20-24 [in Russian].
 22. Bachin, V.A., Kvasnitsky, V.F., Kotelnikov, D.I. et al. (1991) *Theory, technology and equipment of diffusion welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 23. Kozakov, N.F. (1968) *Diffusion welding in vacuum*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 24. Gurevich, S.M. (1990) *Reference book on welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
 25. Sergeev, A.V. (1990) *Diffusion welding of aluminium alloys. In: Achievements and perspectives of development of diffusion welding*. Moscow, 48-54 [in Russian].
 26. Chudin, V.N., Timokhov, A.P., Terentiev, M.M. et al. (1992) Diffusion welding of hollow structures of sheet high-strength aluminium alloys. *Svarochn. Proizvodstvo*, **10**, 5-7.
 27. Falchenko, Yu.V., Ustinov, A.I., Petrushynets, L.V. et al. (2017) *Device for diffusion welding of three-layer honeycomb panels*. Pat. 113424 Ukraine, Int. Cl. B23K 20/00, B23K 20/14 [in Ukrainian].
 28. Bashurin, A.V., Mastikhin, E.Yu., Kolmykov, V.I. (2010) Diffusion welding of hollow bimetal panels. *Zagotov. Proizvodstva v Mashinostroenii*, **1**, 13-15 [in Russian].

СУЧАСНІ СПОСОБИ ОТРИМАННЯ ТРИШАРОВИХ ПАНЕЛЕЙ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ (Огляд)

Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО, Л. В. ПЕТРУШИНЕЦЬ

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.u

Тришарові панелі з періодичним комірчастим заповнювачем з алюмінієвих сплавів є перспективними для застосування у виробках аерокосмічної техніки, наземному та водному транспорті. Унікальність конструкцій тришарових панелей полягає в тому, що при відносно невеликій масі вони характеризуються високими значеннями міцності і жорсткості. В роботі розглянуті основні типи тришарових панелей, конструктивні особливості виготовлення заповнювачів, методи з'єднання смуг стільникового заповнювача між собою, а також елементів тришарової панелі в єдину конструкцію. Метою представленого огляду є аналіз сучасних способів отримання тришарових панелей зі сплавів алюмінію. Аналіз літературних даних показав, що найбільшого поширення набули такі способи з'єднання елементів тришарових панелей як склеювання та паяння. Однак основними їх недоліками є збільшення ваги конструкції за рахунок застосування клею або припою. Для зварювання тришарових панелей є перспективним застосування дифузійного зварювання при виготовленні стільникового заповнювача з більш міцного титанового сплаву або застосування спеціалізованого оснащення, яке дозволяє обмежити ступінь пластичної деформації конструкції. Бібліогр. 28, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: алюмінієві сплави, тришарові панелі, заповнювач, склеювання, паяння, зварювання

MODERN METHODS OF MANUFACTURING THREE-LAYER PANELS FROM ALUMINIUM ALLOYS (Review)

Yu. V. FALCHENKO, L. V. PETRUSHINETS

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Three-layer panels with periodic cellular core from aluminium alloys are promising for application in aerospace products, ground and water transportation. The uniqueness of the three-layer panel design consists in that they are characterized by high values of strength and rigidity at a relatively small mass. The work deals with the main types of three-layer panels, design features of manufacturing the cores, methods to join the honeycomb core strips to each other, as well as the three-layer panel elements into one structure. The objective of the presented review is analysis of modern methods of manufacturing three-layer panels from aluminium alloys. Analysis of published data showed that such methods of joining the three-layer panel elements as adhesive bonding and brazing became the most widely applied. Their main disadvantage, however, is increase of the structure mass due to application of an adhesive or braze alloy. Application of diffusion bonding with manufacture of honeycomb core from a stronger titanium alloy for joining three-layer panels or application of a specialized fixture, which allows limiting the degree of plastic deformation of the structure, are promising for welding of three-layer panels. 28 Ref., 1 Tabl., 9 Fig.

Keywords: aluminium alloys, three-layer panels, core, adhesive bonding, brazing, welding

Поступила в редакцію 25.04.2018