



## РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПАЯНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ И СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ (Ретроспективный обзор)

А. Н. КОРНИЕНКО, канд. техн. наук, А. М. ЖАДКЕВИЧ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описана история возникновения, развития и применения решетчатых и сотовых конструкций узлов летательных аппаратов. Во второй половине XX в. произошло резкое повышение качества эксплуатационных сплавов и надежности технологий, применяемых при изготовлении самолетов и ракет. В связи с совершенствованием сварных конструкций и трудностями применения традиционных технологий, пайка становится наиболее перспективным способом соединения.

*Ключевые слова:* технология пайки, авиастроение, ракетостроение, решетчатое крыло, сотовая конструкция, конструкционные материалы, история техники

В истории науки и техники существует немало примеров, когда отдельные научные идеи находят свое воплощение спустя многие годы после их возникновения и опубликования. Одним из таких примеров является разработка, создание и производство решетчатых и сотовых конструкций, используемых при изготовлении самолетов, вертолетов, ракет, кораблей, вагонов, автомобилей, зданий и др.

Решетчатые конструкции представляют собой аэродинамические полиплановые поверхности, имеющие значительные преимущества по сравнению с моноплановыми и создающие огромные перспективы для использования в новых типах летательных аппаратов. В зависимости от размеров и назначения они могут быть изготовлены как с помощью сварки, так и пайки, но последняя доминирует.

Сотовые конструкции (панели) — это несущие конструкции малой средней плотности (в некоторых случаях менее  $1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), имеющие, как правило, обшивки и наполнитель различной формы. В большинстве случаев они соединены между собой пайкой, так как имеют протяженные закрытые полости, куда невозможно ввести сварочный инструмент.

Решетчатое крыло самолета представляет собой пространственную систему, состоящую из большого количества профилированных или плоских планов, соединенных между собой боковинами. Существует два основных вида решетчатых крыльев — рамное (с планами, перпендикулярными боковинам и параллельными между собой, рис. 1, а) и сотовое с диагональным или параллельным набором планов. Однако наибольшее распро-

странение получило крыло с квадратными и шестигранными сотами, когда диагональный набор планов составляет с боковинами угол  $45^\circ$  (рис. 1, б, в).

Разработке и расчету конструкций, эксплуатации летательных аппаратов с решетчатыми и сотовыми узлами посвящено достаточное количество работ, однако особенности технологии изготовления с применением пайки рассмотрены только в отдельных журнальных публикациях. Так, авторами работы [1] подробно описаны технологии изготовления авиационных конструкций из титановых сплавов и в специальной главе — технологии сварки, однако использование пайки не упоминается.

Целью настоящей работы является исторический анализ развития решетчатых и сотовых авиационных и ракетных конструкций, изготавливаемых с применением пайки, с представлением видов новых конструкционных материалов и материалов для пайки. Учитывая непрерывно усложняющиеся условия эксплуатации и повышающиеся требова-

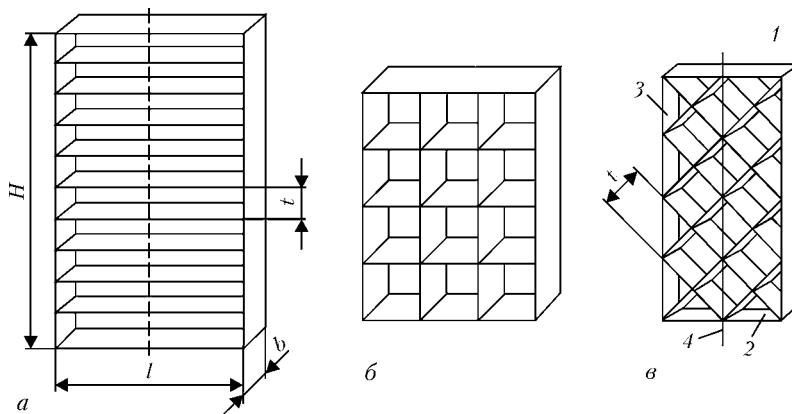


Рис. 1. Схемы основных видов решетчатых крыльев: а — рамное; б, в — сотовое соответственно с перпендикулярным и диагональным набором планов; 1, 2 — верхний и нижний планы; 3 — боковая стенка; 4 — ось крыла; H — расстояние между верхним и нижним планами; l — расстояние между крайними боковинами решетчатого крыла; b — расстояние между наиболее удаленными друг от друга точками профиля плана (хорда крыла); t — расстояние между соответствующими точками двух соседних планов

ния к жаростойкости, прочности и другим характеристикам материалов, оценка возможностей и определение перспектив применения паяных авиационных и ракетно-космических конструкций особенно актуальны. Сварка комплексно-легированных сталей, сплавов титана и алюминия затруднена, поэтому пайка остается основным способом соединения сложных конструкций из трудносвариваемых сплавов.

Рассматриваемые конструкции нашли применение еще в 1883 г. в летательной машине английского инженера Г. Филлипса, в которой план представлял собой вертикальную решетку с большим количеством легких деревянных планов, скрепленных вертикальными стойками и расчалками, суммарная площадь этой решетки составляла  $13 \text{ м}^2$  (рис. 2). В том же году Х. Максим построил летательную машину многопланового типа (рис. 3).

В 1911 г. С. А. Чаплыгиным была написана статья «Теория решетчатого крыла» [2], опубликованная в 1914 г. В начале прошлого века Н. Е. Жуковский со своими учениками положил начало комплексу теоретических и экспериментальных исследований по решетчатым крыльям для аппаратов воздухоплавания [3]. В 1920-е годы комиссия ВСНХ СССР, возглавляемая Н. Е. Жуковским, занималась проектированием тяжелого самолета по схеме триплана с высокой коробкой крыльев и биплановым оперением. Этот самолет (он летал, но серийно не изготавливался) вошел в историю авиации под названием «КОМГА».

В процессе развития самолетостроения по мере увеличения скоростей полета главное внимание уделялось применению моноплановых крыльев. Только в конце 1940-х годов продолжили работы по аэродинамике решетчатых складывающихся крыльев на дозвуковых скоростях с целью возможного использования их на планируемых торпедах. Результаты этих работ легли в основу дальнейших исследований по решетчатым крыльям, что позволило с 1955 г. под руководством С. М. Белоцерковского [4, 5] создать целое комплексное научное направление, включающее широкий спектр теоретических и экспериментальных исследований по аэродинамике, конструкции, прочности, массе и технологии изготовления решетчатых крыльев. Этой проблемой занимались в ЦАГИ и ВВИА им. профессора Н. Е. Жуковского. Работы, проведенные в тесном содружестве с рядом НИИ и КБ, позволили разработать теоретические методы расчета аэродинамических характеристик решетчатых крыльев для широкого диапазона скоростей от звуковых до сверхзвуковых [5]. Большая заслуга в этом принадлежит ученым-исследователям С. М. Белоцерковскому, В. С. Демидову, Л. А. Одноволу, Ю. З. Сафину, В. А. Шитову, П. Н. Кравченко, Б. И. Ульянову и др.

В современном исполнении решетчатые крылья представляют собой новый вид несущих стабилизирующих и управляющих поверхностей, имеющих ряд преимуществ перед традиционными моноплановыми крыльями: планы соответствующим образом спроектированы и позволяют получить плав-

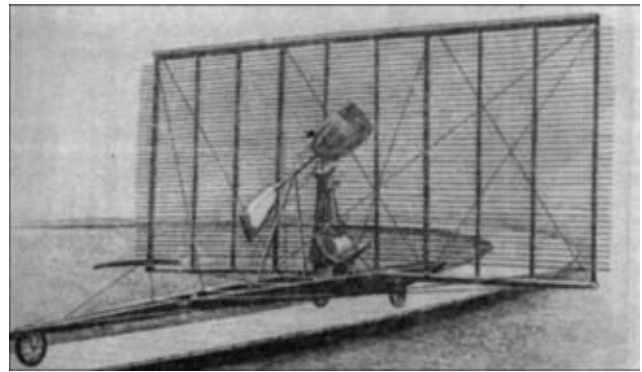


Рис. 2. Самолет Г. Филлипса

ное обтекание до углов атаки  $40...50^\circ$ ; на сверхзвуковых скоростях планы решетки можно расположить достаточно близко друг от друга и получить большую суммарную площадь решетчатого крыла и значительно увеличить подъемную силу [5–7].

В результате анализа прочностных и свойств жесткости полиплановых систем, выполненных А. И. Тюленевым с сотрудниками, были определены основные направления по выбору рациональных конструкций решетчатого крыла [8]. Ими были предложены и новые конструктивные схемы решетчатых крыльев с переменным шагом по размаху крыла, с косоугольной ячейкой, цилиндрические, с полыми планами и пр. (рис. 4). Основной целью рациональной разработки решетчатого крыла явилось обеспечение необходимой прочности и минимизация массы в условиях аэродинамического нагрева с высокими температурами торможения. Работы сводились к отысканию комплексного варианта конструктивных форм, сочетающих свойства выбранных конструктивных материалов и рациональной технологии изготовления решетчатого крыла. Результаты проведенных исследований позволили выявить особенности и преимущества решетчатых крыльев, разработать методы их практического расчета и изготовления, когда при конструировании ряда объектов затруднено или невозможно применение традиционных моноплановых крыльев [5, 9–11].

Первые образцы решетчатых крыльев изготавливали клепкой, сваркой, кокильным литьем. Известны примеры, когда стальные решетчатые крылья выфрезеровывали из монолитных поковок ценой огромных трудозатрат, при этом потери металла в стружку составляли до 90 % исходной заготовки. С появлением в середине прошлого века

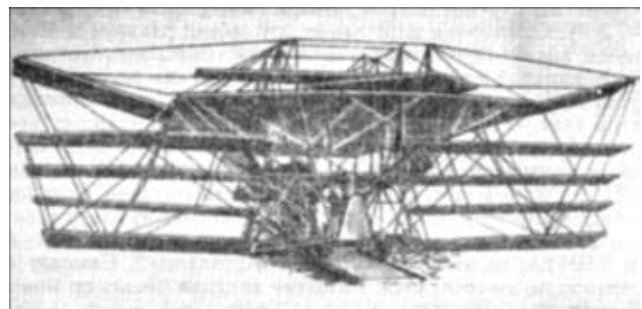


Рис. 3. Самолет Х. Максима

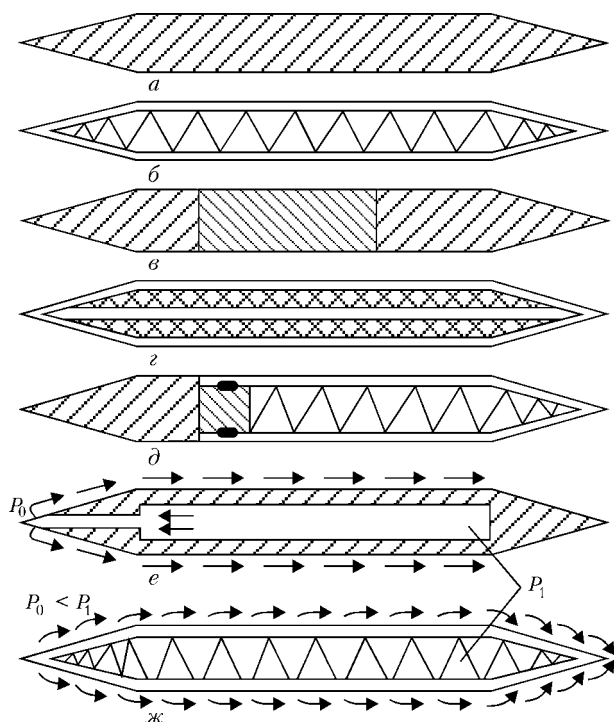


Рис. 4. Варианты конструкций планов решетчатого крыла: *a* — обычный, сплошного сечения; *b* — полый; *c* — составной; *z* — многослойный; *d* — комбинированный; *e*, *ж* — охлаждаемые, где  $P_1$ ,  $P_0$  — соответственно давление охлаждающей и окружающей среды

сотовой (ферменной) схемы решетчатых крыльев, отличающихся большей сложностью, чем рамная конструкция, возникла необходимость исследования и разработки рационального метода изготовления и построения на его основе типового технологического процесса, который позволил бы осуществлять производство указанных изделий с наибольшим технико-экономическим эффектом [5, 6, 11, 12]. Принципиальное значение для изготовления решетчатых крыльев имел выбор конструкционных материалов.

Более 90 лет важнейшими технологиями соединения элементов авиационных конструкций (наряду с клепкой) остаются сварка и пайка [13]. Отношение к различным способам сварки на протяжении первой половины прошлого века менялось в зависимости от применяемых в авиационной промышленности материалов и развития сварочной техники [14]. В то же время объем применения пайки ацетиленокислородным пламенем возрастал. Пайка латунными припоями конкурировала с дуговой и газовой сваркой стальных конструкций, а пайку конструкций и ремонт двигателей из алюминиевых сплавов осуществляли легкоплавкими припоями из алюминиевых сплавов. Особенно широкое применение получила пайка с целью ремонта в годы Второй мировой войны. Важные теоретические и экспериментальные результаты для различных условий эксплуатации крыльев и технологии их изготовления пайкой в послевоенный период получены профессором В. П. Фроловым [15–18].

В современном авиационном производстве решетчатые крылья изготавливаются различными методами с использованием принципиально разных техноло-

гических процессов. Наряду со способами холодной обработки (клепка, склеивание, механическая и электроэрозионная обработка) широко используется горячая обработка — сварка, пайка, литье и штамповка. Кроме того, возможно применение сочетаний различных технологических процессов [5, 9–12, 19–24]. Следует отметить, что с середины прошлого века установилась тесная связь между созданием новых образцов авиационной техники, ракетных комплексов, разработкой специальных конструкционных материалов и сварочными технологиями.

В 1960-х годах на металлургических предприятиях по переработке цветных металлов и сплавов Министерства авиационной промышленности СССР (Куйбышевском металлургическом заводе им. В. И. Ленина (КМЗ), Верхне-Салдинском металлургическом объединении, Белокалитвинском металлургическом заводе, Ступинском металлургическом комбинате и Каменск-Уральском металлургическом заводе) запущен в эксплуатацию целый ряд вертикальных гидравлических прессов отечественного производства усилием от 6 до 75 тыс. тс, причем самый мощный в мире гидропресс усилием 75 тыс. тс был впервые запущен в эксплуатацию на КМЗ им. В. И. Ленина.

Данное оборудование позволило получать различные решетчатые и сотовые конструкции из алюминия и титановых сплавов методом горячего прессования. Высокая точность изготовления таких конструкций с минимальной окончательной механической обработкой (но с толщиной стенки более 2 мм) открыла широкие перспективы для внедрения решетчатых и сотовых конструкций в машиностроении, строительстве и судостроении. Однако в подобных конструкциях авиакосмической техники толщины планов и сот составляют менее 1 мм и получить их горячим прессованием практически невозможно. В связи с этим на первый план выходит технология пайки и склеивания элементов решетчатых и сотовых конструкций.

Для изготовления решетчатых крыльев пайкой применяют сплавы на основе алюминия, магния, железа, титана, никеля, бериллия, ванадия, вольфрама, ниобия, молибдена, тантала, хрома. К таким сплавам на основе алюминия относятся АМг6, АМг2, АМг, Д16АТ, АЦМУ; железа — 30ХСА, 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т, 08Х25Н16Г7АР (ЭИ835), 10Х16Р4БА (ЭП 56, ЭП 258); титана — ОТ4, ВТ6; ниобия — ВН2; молибдена — ВМ1; тантала и вольфрама — ВВ1 и т.п. [5, 9, 10].

Для пайки указанных материалов применяются стандартные припои ПСр40, ПСр37,5, ПОС 61, а также сравнительно новые марки припоев, нашедшие промышленное использование: для алюминиевых сплавов — № 48 (Zn–7Al–3,9Cu–0,5Co), № 34А (Al–28Cu–6Si), 36А (Al–20–Cu–20Zn–3,5Si); для титановых — типа Ag–17Cu, Ag–20Ti–15V, Ag–20Pd–5Mn; для тугоплавких — Hf–20Ti–15V, Zr–25Nb, Zr–20Nb–3Mo, Hf–20Ti–6Mo; для пайки жаропрочных сталей и никелевых сплавов — Cu–20Mn–19Ni, Г70НХ (Mn–23Ni–5Cr–2Fe–0,8Si–0,3C), ВПр1 (Cu–30Ni–2Si–1,5Fe–0,3В), ПЖК-35 (Ni–35,5Mn–18,5Cr–9Co–1,5Fe–

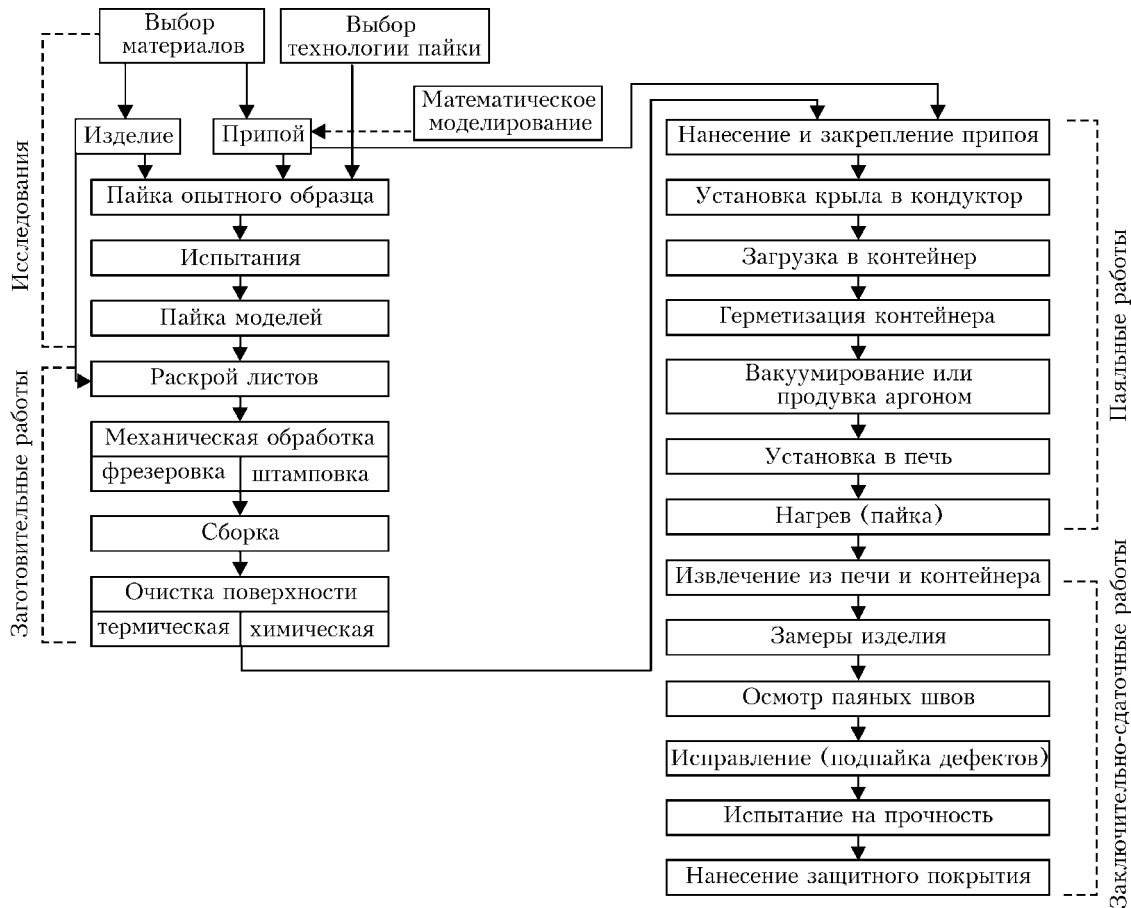


Рис. 5. Принципиальная схема типового технологического процесса изготовления цельнопаяных решетчатых крыльев

0,8Si-0,1B), 6МА (Ni-23Mo-15Cr-7Si-0,4B), №3 (28Mn-28Fe-14Ni-0,1Si-0,1B). Припой 6МА и №3 специально разработаны для пайки решетчатых крыльев [5].

Принципиальная схема типового технологического процесса изготовления цельнопаяных решетчатых крыльев приведена на рис. 5. Технологический процесс, основные режимы и параметры пайки конструкционных материалов, широко используемых в авиастроении, приведены в работах [5, 25-28].

При выполнении работ по созданию ракеты РВВ-АЕ (воздух — воздух, воздух — земля) ИЭС им. Е. О. Патона в 1984 г. было поручено создание оптимальной технологии изготовления решетчатых рулей ракеты; эту работу выполняли совместно с ПО им. Артема и НПО «Вымпел» под руководством В. Ф. Хорунова. В кратчайшие сроки была предложена новая конструкция руля, припой, технология пайки и оборудование для ее осуществления. Итогом этой работы стало создание высокопроизводительной роботизированной технологической линии [29-33]. Вместо тяжелой головной части руля, получаемой фрезерованием из массивной заготовки, была предложена легкая паяная конструкция. Сборку решеток «взамок» заменили роботизированной сборкой специальных профилей («зиг-

гов») без отбортовки на боковины с нанесением специального пастообразного припоя [30, 31]. Для пайки заготовок была создана высокопроизводительная карусельная вакуумная печь [32], в которую одновременно загружали пять изделий с периодичностью загрузки-выгрузки 30 мин. Пайку осуществляли при температуре 1100...1120 °С, что позволило сохранить механические свойства основного металла (по сравнению с пайкой при 1180...1200 °С с применением припоя ВПр10).

Для обоснования выбора режима нагрева было проанализировано развитие напряжений и деформаций в решетчатой конструкции в неравномерном

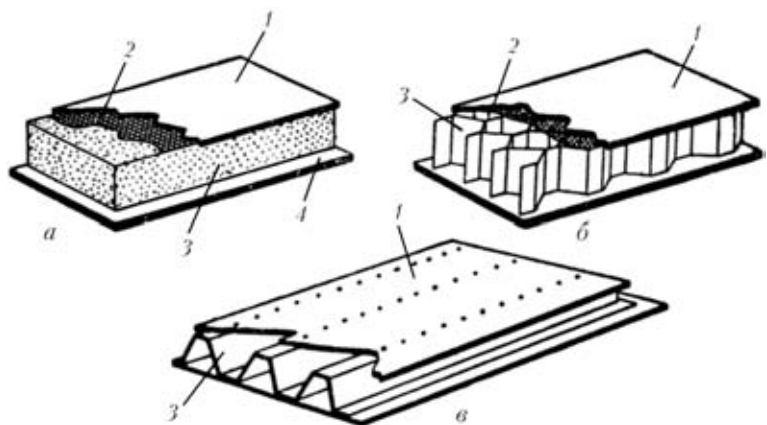


Рис. 6. Типы слоистых панелей со сплошным (а), сотовым (б), гофрированным (в) заполнителями: 1, 4 — соответственно первая и вторая обшивки; 2 — клеевая прослойка или припой; 3 — наполнитель

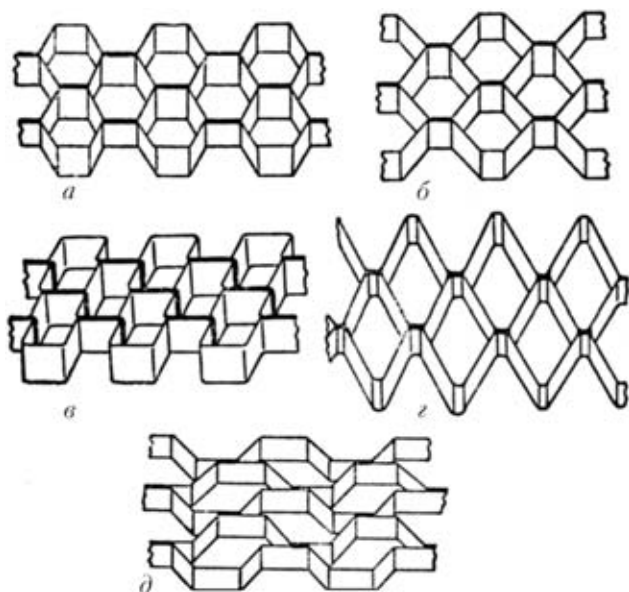


Рис. 7. Формы ячеек сотовых заполнителей: а — шестигранная; б — ромбическая; в — квадратная; з — синусоидальная; д — шестигранная смещенная

температурном поле [34], использование которых позволило получить готовую продукцию высокого качества и точности.

Стендовые и натурные испытания показали значительное преимущество рулей, изготавливаемых по технологии ИЭС им. Е. О. Патона. В результате снижения сопротивления руля на 10 % улучшились тактико-технические характеристики ракеты.

В конструкциях современных машин широко применяются детали и узлы из листового материала, соединенного для жесткости склеиванием, сваркой и пайкой с профилями различной формы. В последние годы подобные элементы все чаще заменяются слоистыми конструкциями (рис. 6). Особенно широкое распространение они получили в самолетостроении [27, 28]. Перспективность таких конструкций в первую очередь связана с их высокой относительной жесткостью и прочностью. Сотовые конструкции являются одной из разновидностей слоистых и представляют собой сочетание обшивок и сотового заполнителя, расположенного между ними [26, 27]. Общая устойчивость сотовых конструкций во много раз превышает устойчивость входящих в них листов, что позволяет конструировать такие конструкции без подкрепляющего набора стрингеров, даже при увеличенном

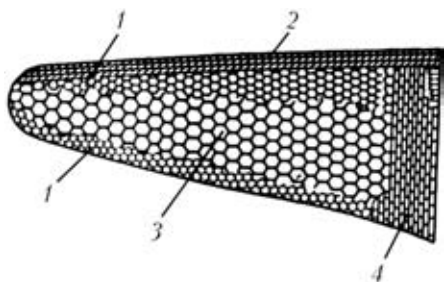


Рис. 8. Схема расположения сотовых заполнителей с различными размерами ячеек: 1, 3 — соответственно небольшие и большие размеры ячеек; 2, 4 — ячейки, перерастянутые соответственно в продольном и поперечном направлении

расстоянии между нервюрами или шпангоутами. Формы ячеек для заполнителей могут быть квадратными, ромбическими, синусоидальными, шестигранными и шестигранными со смещением (рис. 7).

В современной авиационной технике широко применяют конструкции с сотовыми заполнителями для изготовления крыльев, панелей, закрылок, рулей управления, хвостовой части центроплана, тормозных щитков, настила пола и хвостовых отсеков, лопастей вертолета, панелей фюзеляжа и других конструкций. Используя сотовые заполнители с различной объемной массой, т. е. с различными размерами и формой сотовой ячейки, а также с различными материалами и толщиной фольги удастся значительно повысить прочность конструкции (рис. 8) [27, 28].

Сотовые конструкции имеют ряд преимуществ перед конструкциями, выполненными из обшивок, подкрепленных стрингерами и нервюрами: высокую удельную прочность, жесткость и устойчивость при продольном сжатии; хорошие усталостные характеристики; снижение количества деталей, входящих в изделие, хорошее качество поверхности; снижение трудоемкости сборочных работ и массы конструкции; значительно лучшие тепло- и звукоизоляционные свойства. Так, относительная масса сверхзвукового американского бомбардировщика «Хасспер В-58», на котором применены сотовые конструкции (рис. 9), меньше на 16,5 % чем самолетов RR-66С, RB-45С, В-57Е, у которых этот показатель составляет 25,1... 25,9 % [25]. Фирма «Норт-Америкен» при изготовлении межконтинентального бомбардировщика ХВ-70 «Валькирия» применила паяные панели с сотовыми заполнителями для ряда конструкций узлов и агрегатов. На этом самолете сотовые панели составляют площадь более 1800 м<sup>2</sup> или 50 % всей поверхности самолета (рис. 10). Эти конструкции весьма нагружены и подвержены действию температур порядка 330... 350 °С. Подобная конструкция использована в НПО им. С. А. Лавочкина при создании советского межконтинентального бомбардировщика «Буря» [35].

Применение сотовых конструкций для тормозных щитков самолета В-86 позволило снизить их массу на 30 %, использование их в отсеках лопастей вертолетов Боинг, Сикорски S-61, S-5, Вертол-107 позволило повысить ресурс работы лопастей с 500... 600 до 1000... 1500 ч. Составные конструкции широко использовались и используются в самолетах серии Боинг, DC, Конвэр, Фантом, Локхид, Конкорд, Таон, Веккерс, аэробусах фирмы «Эйрбас»; отечественных самолетах серии Ан, российских самолетах серии Ту, Ил, Як, Су, Бе; вертолетах серии Ми, Боинг, Сикорски, Вертол и другой авиационной технике.

Теоретические разработки советских ученых и практика применения решетчатых и сотовых конструкций в ракето- и авиастроении во второй половине прошлого века послужили одним из факторов, обусловивших высокие тактико-технические качества вооружений, превосходящие аналогичные показатели западных стран. Советские ракеты и авиационная техника служили сдерживающим фак-

тором и обеспечили баланс между вооружением армий США и СССР [36].

Ракеты различного назначения с решетчатыми крыльями — полиплановыми панелями, разработанные в КБ бывшего Советского Союза, обладали значительным превосходством по тактико-техническим данным над аналогичными ракетами западных стран. В качестве примера удачных решений можно отметить крылатую ракету-носитель «Стрела» (ОКБ-52, ныне НПО «Машиностроение», генеральный конструктор В. Н. Челомей); комплекс тактических и оперативно-тактических ракет типа С-300 (НПО «Антей», генеральный конструктор Г. А. Ефремов); усовершенствованный в КБ «Алмаз» комплекс С-400 (генеральный конструктор А. А. Леманский) и др. [23]. В решетчатых рулях советских ракет отсутствует срыв потока при любых углах атак и уход от цели, что обеспечивает высокую точность поражения, до сих пор не достигнутую ракетными комплексами других стран. Особо следует отметить использование таких крыльев в конструкции аварийного спасения космонавтов, которой нет до сих пор в космических кораблях США. Аналогичное положение и в авиации. Так, МиГ-23 сбивает цели на высоте от 50 м до 25 км. Эти истребители успешно противостояли в 1982 г. в боях в Ливане более новым американским Ф-15 и Ф-16 [35].

Исследовательским центром Ленгли НАСА для фирмы «Локхид» (США) разработана технология изготовления несущей конструкции центроплана из титановых сплавов (Ti-6Al-4V), объединяющая сварку и пайку. К панели толщиной 1,8 мм точечной контактной сваркой приваривают Z-образные ребра толщиной 1,2 мм, в зазор между листом и ребрами (до 0,1 мм — толщина лезвия бритвы) закладывают узкие полоски припоя из алюминиевых сплавов. Бесфлюсовую пайку осуществляют в вакуумных печах в течение 10 мин при температуре  $710 \pm 5$  °С [37]. Значительный объем в российском авиастроении занимает пайка конструкций из титановых и нержавеющей сталей. В основном ее выполняют в стационарных и монтажных камерах в инертных газах индукционным нагревом и используют самофлюсующие припои. Характерным образцом новейшей авиационной конструкции являются ребристые панели центроплана истребителя Су-30 [17]. Одной из фирм, ведущей крупномасштабные работы по совершенствованию существующих и созданию новых высокоэффективных технологий, является корпорация «ИРКУТ» (РФ). Здесь для сварки и пайки используют как высококонцентрированные источники энергии (электронные, лазерные и ионные лучи), так и токи высокой частоты, радиационное и ионизирующее излучение. Пайка ведется в вакууме, раз-

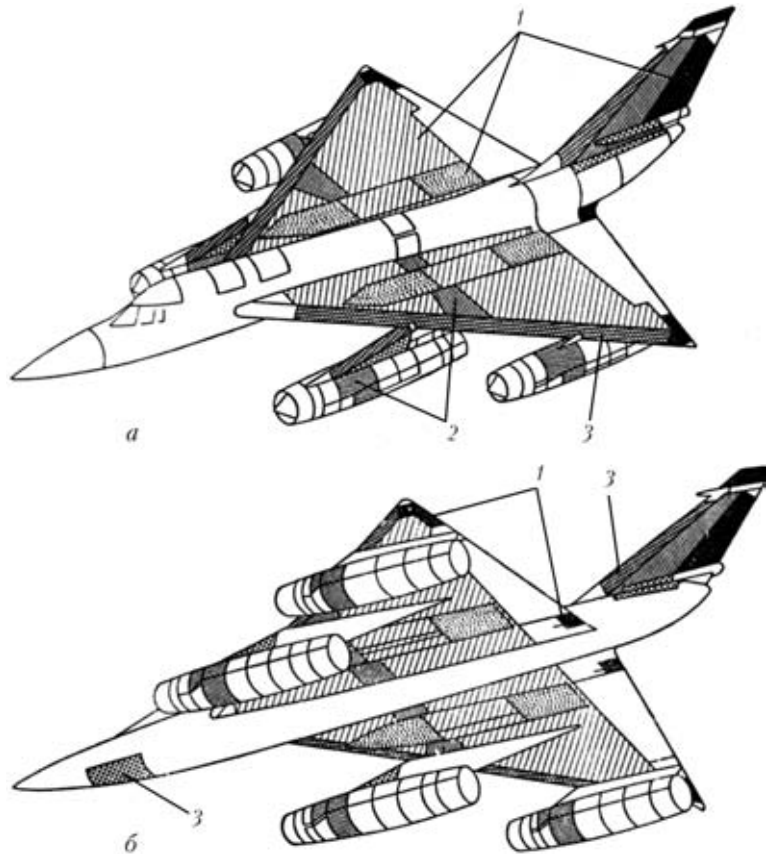


Рис. 9. Применение сотовых панелей в конструкции самолета «Хаспер В-58»: а, б — соответственно вид сверху и снизу; 1 — обшивки дюралюминиевые и соты из стеклоткани; 2 — обшивки и соты дюралюминиевые; 3 — носки крыла и руль направления с дюралюминиевыми сотами, носки киля и съемные панели с сотами из стеклоткани

личных защитных средах, с самофлюсующими припоями и др. [17, 37].

В основе создания новой конкурентоспособной техники должна лежать концепция опережающего развития технологии изготовления. В соответствии с этим принципом оптимальной может быть следующая последовательность: создание научно-технических основ, формирование конструктивно-технологического вида изделия, разработка конкретных технологий, подготовка производства и изготовление с прогнозированием качества [38].

До настоящего времени окончательно не решена проблема изготовления цельносварного (паяного) алюминиевого самолета [39, 40]. В мировом гражданском авиастроении несущие конструкции серийных самолетов представляют собой клепаные конструкции. Основные усилия специалистов раз-

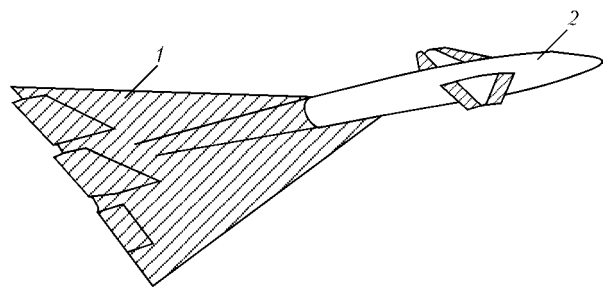


Рис. 10. Применение паяных панелей (2) с сотовым наполнителем (1) в конструкции самолета ХВ-70 «Валькирия»



личных направлений направлены на разработку высокопрочных и пластичных алюминиевых сплавов, сохраняющих свои свойства при сварке и пайке. Одновременно специалистами НИАТ, ИЭС им. Е. О. Патона, МГТУ им. Н. Э. Баумана, МАТИ им. К. Э. Циолковского и другими ведутся работы по созданию технологий и материалов, обеспечивающих надежную эксплуатацию алюминиевых самолетов. Перспективными для цельносварных (паяных) фюзеляжей и планов являются ребристые панели и шпангоуты из новых сплавов системы Al-Mg-Sc-Zr-Ti (типа 1421) [40]. Благодаря надежной технологии соединения можно дифференцированно, точно в соответствии с расчетными выбирать размеры ребер и толщину панелей, что и позволит снизить массу летательных аппаратов. По прогнозам специалистов в ближайшее время авиация должна перейти на жидководородное топливо и в новых поколениях самолетов криогенные топливные баки представляют собой цилиндрические емкости, выполненные из вафельных или ребристых панелей, с толщиной полотна 1,5...3 мм и толщиной стыков в зоне сварки 2...10 мм [41]. В этом случае также наиболее экономичным может быть применение паяных сотовых конструкций.

## Выводы

1. Решетчатые и сотовые конструкции в начале XX века были признаны в качестве рациональных и эффективных элементов авиационной техники как достаточно прочные и относительно легкие. Научные основы расчета таких конструкций были заложены рядом ученых, в том числе Н. Е. Жуковским, С. А. Чаплыгиным, С. М. Белоцерковским, А. И. Тюленевым и др. В течение первой половины XX века авиационные решетчатые и сотовые конструкции различного типа изготавливались преимущественно с применением клепки и склеивания.

2. С появлением сверхзвуковой авиации и использованием в качестве конструкционных материалов высокопрочных сталей, алюминиевых и титановых сплавов наметилось применение новых технологий их изготовления (литье, штамповка, механическое фрезерование, электрохимическое травление и т. п.). Ограниченное применение сварки объясняется плохой свариваемостью большинства авиационных материалов, трудностями борьбы с деформациями и напряжениями, сложностью конструкций.

3. Для изготовления авиационных конструкций с решетчатыми и сотовыми элементами наиболее перспективной технологией является пайка. Разработкой припоев и техники пайки занимаются в ИЭС им. Е. О. Патона, ВИАМ, НИАТ, МГТУ им. Н. Э. Баумана и др. Создана технология пайки конструкций из сплавов на основе алюминия, магния, железа, титана, никеля, бериллия, ванадия, вольфрама, ниобия, молибдена, тантала, хрома, что позволило конструкторам авиационной техники увеличить номенклатуру используемых материалов, дифференцированно, в соответствии с расчетами, назначать параметры элементов конструкций.

В качестве припоев в ряде технологий применяют как известные ранее (оловянистые, серебряные), так и на основе систем Al-Cu-Si, Zr-Nb, Mn-Cr-Fe и др.

1. *Технология* производства титановых самолетных конструкций / А. Г. Братухин, Б. А. Колачев, В. В. Садыхов и др. — М.: Машиностроение, 1995. — 448 с.
2. *Чаплыгин С. А.* Теория решетчатого крыла // Собр. соч. — М.: Изд-во техн.-экон. лит., 1948. — Т. 2. — С. 414–430.
3. *Жуковский Н. Е.* Теоретические основы воздухоплавания // Собр. соч. Лекции. — М.; Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1938. — Вып. 1. — 194 с.
4. *Белоцерковский С. М.* Тонкая несущая поверхность в дозвуковом потоке газа. — М.: Наука, 1965. — 242 с.
5. *Белоцерковский С. М., Одновол Л. А., Сафрин Ю. З.* Решетчатые крылья. — М.: Машиностроение, 1985. — 320 с.
6. *Аэродинамика* частей самолета при больших скоростях / Под ред. А. Ф. Доновена, Г. Р. Лодрена. — М.: Изд-во иностр. лит., 1959. — 701 с.
7. *Исследование* сверхзвуковой аэродинамики самолета на ЭВМ / Под ред. С. М. Белоцерковского. — М.: Наука, 1982. — 335 с.
8. *Тюленев А. И., Грищенко В. С., Сметаненко В. А.* Динамическая модель упругой несущей поверхности с регулярной конструктивной неоднородностью // Динамика систем, несущих подвижную распределительную нагрузку: Сб. тр. — Харьков: ХАИ. — 1980. — Вып. 2. — С. 126–136.
9. *Григорьев В. П.* Технология самолетостроения. — М.: Оборонгиз, 1960. — 542 с.
10. *Горбунов М. Н.* Основы технологии производства самолетов. — М.: Машиностроение, 1976. — 260 с.
11. *Технология* самолетостроения / А. Л. Абибов, Н. М. Борисов, В. В. Бойцов и др. — М.: Машиностроение, 1970. — 598 с.
12. *Белоцерковский С. М., Скрипач Б. К., Табачников В. Г.* Крыло в нестационарном потоке газа. — М.: Наука, 1971. — 767 с.
13. *Матвиенко С. В., Астафьев А. Г., Карасев И. С.* Сварка и родственные технологии в самолетостроении. Тенденции развития // Сварка в Сибири. — 2003. — № 2. — С. 36–40.
14. *Фетисов Г. П.* Сварка и пайка в авиационной промышленности: Учеб. пособие. — М.: Машиностроение, 1983. — 216 с.
15. *Справочник* по пайке / Под ред. С. М. Лоцманова, И. Е. Петрунина, В. П. Фролова. — М.: Машиностроение, 1975. — 407 с.
16. *Лоцманов С. Н., Фролов В. П.* Технологичность паяных конструкций: Справ. пособие. — М.: Машиностроение, 1969. — С. 81–108.
17. *Фролов В. П., Чекунов М. И.* Уравнение состояния производства паяных конструкций // Производство паяных конструкций и стандартизация технологических процессов пайки: Тр. ин-та. — М.: ВНИИМаш. — 1975. — Вып. 2. — С. 131–144.
18. *Фролов В. П.* Математическое моделирование процессов пайки // Пайка в машиностроении: Материалы конф. — М.: МДНТП, 1967. — Сб. 1. — С. 43–58.
19. *Корниенко А. Н.* Создание первых сварных конструкций. Ч. 1. Корабли, воздушный и наземный транспорт // Автомат. сварка. — 1996. — № 11. — С. 40–47.
20. *Корниенко А. Н., Жадкевич А. М.* Проблемы качества паяных соединений и разработка припоев // Там же. — 2005. — № 3. — С. 48–53.
21. *Жадкевич О. М.* Розвиток матеріалів для високотемпературного паяння алюмінію та його сплавів // Зб. наук. праць НТУУ КПІ. Дослідження з історії техніки. — К.: 2004. — Вып. 4. — С. 67–71.
22. *Жадкевич А. М.* Вакуумная пайка при изготовлении авиационных высокотемпературных теплообменников // Материалы III Всеукр. науч.-техн. конф. молодых ученых та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології». — К.: ІЕС ім. Е. О. Патона, 2005. — С. 14–16.
23. *Технология* низкотемпературной вакуумной пайки узлов решетчатых конструкций из алюминиевых сплавов / В. Ф. Хорунов, В. Ф. Лапчинский, В. И. Швец, В. Ф. Шульм / Автомат. сварка. — 1992. — № 2. — С. 52–53.
24. *Жадкевич А. М.* Бесфлюсовая пайка алюминия // Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Сварка—XXI века. Славяновские чтения»: — Липецк: Гос. техн. ун-т, 2004. — Кн. 1. — С. 307–316.

25. Бермудский В. Е., Крысин В. Н., Лесных С. И. Производство сотовых конструкций. — М.: Машиностроение, 1966. — 282 с.
26. Единогур А. И., Вайнберг М. В., Иерусалимский К. М. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование. — М.: Машиностроение, 1986. — 200 с.
27. Бермудский В. Е., Крысин В. Н., Лесных С. И. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций. — М.: Машиностроение, 1975. — 297 с.
28. Панин В. Ф. Сотовые конструкции. — М.: Машиностроение, 1982. — 153 с.
29. Пайка решетчатых конструкций в вакууме / В. Ф. Хорунов, Ю. Б. Малевский, М. М. Дьяченко и др. // Автомат. сварка. — 1984. — № 1. — С. 61–62.
30. А. с. 1244861 СССР, МКИ. Припой для пайки нержавеющей сталей и никелевых сплавов / В. Ф. Хорунов, А. В. Кужель, М. М. Дьяченко и др. — Заявл. 27.02.85. — Оpubл. 15.07.86.
31. А. с. 1485542 СССР, МКИ. Припой для пайки жаропрочных и жаростойких сталей и никелевых сплавов / В. Ф. Хорунов, И. А. Владимирская, О. В. Кузнецов и др. — Заявл. 27.05.87. — Оpubл. 30.12.88.
32. Установка П126 роторная многопозиционная для вакуумной пайки / В. Ф. Хорунов, Л. В. Чесноков, М. Ф. Зевакин, В. П. Зубченко. — Киев, 1989. — (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; № 8).
33. Хорунов В. Ф., Дыхно С. Л., Зубченко В. П. Технологический процесс изготовления решетчатых конструкций // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Пайка в машиностроении», Тольятти, 13–15 февр., 1991. — Тольятти: Тольят. политехн. ин-т, 1991. — С. 76.
34. Махиенко В. И., Хорунов В. Ф. Теоретический анализ развития напряжений и деформаций в решетчатой конструкции в неравномерном температурном поле // САПР ТП сварки, пайки, литья и нанесения газотермических покрытий. — М.: МДНТП, 1985. — С. 119–123.
35. Калашников М. Битва за небеса. — М.: АСТ, 2003. — 407 с.
36. Mitchell J. Man and machines. — London: University of Cambridge, 1977. — 364 p.
37. Левтова К. А., Байчер Л. И., Филлдор О. А. Особенности совмещения процессов пайки и диффузионной сварки при изготовлении сотовых конструкций из титановых сплавов // Авиацион. пром-сть. — 1992. — № 2. — С. 50–52.
38. Редьки В. В. Производство и надежность сварных конструкций // Тез. докл. науч.-техн. конф., 26–28 янв. 1993. — М.: Калининград. — М.: МГТУ. — 1993. — 90 с.
39. Сварка в самолетостроении / Г. А. Кривов, В. Р. Рябов, А. Я. Ищенко и др.; Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: МИИВЦ, 1998. — 696 с.
40. Денисов Б. С., Болгова Г. И. Опыт создания цельносварных конструкций летательных аппаратов из сплава 1420 // Авиацион. пром-сть. — 1991. — № 1. — С. 1–3.
41. Рязанцев В. И., Федосеев В. А. Изготовление сварных криогенных топливных баков из алюминиевых сплавов // Там же. — 1995. — № 7/8. — С. 9–12.

The paper presents the background of emergence, development and application of lattice and honeycomb structures of flying vehicles. An abrupt improvement of the quality of structural alloys and aircraft and missile manufacturing technologies occurred in the second half of the XXth century. In view of the increasing sophistication of the structures and difficulties of applying other technologies, brazing is becoming the most promising joining process. Brazing filler metals and technologies have been developed, which ensured high performance of aircraft and space vehicles.

Поступила в редакцию 13.09.2005

## ЧЕТВЕРТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Научный Центр материаловедения колледжа Иудеи и Самарии проводит в г. Ариэле (Израиль) с 11 по 15 сентября 2006 г. Четвертую международную конференцию по математическому моделированию в материаловедении (ММТ-2006). Конференция проводится под эгидой Министерства науки и технологии Израиля.

### Тематика конференции:

- оптимизация материалов и технологий их получения при производстве сталей и сплавов, сварке и др.;
- разработка новых материалов;
- разработка материалов с заданной структурой и свойствами;
- разработка баз данных по материалам и их применению;
- использование сети интернет для решения проблем оптимизации материалов и технологии;
- информационные системы реального времени;
- нанопроизводство с использованием полимерных растворов;
- полимерные пьезоэлектрические материалы;
- взаимодействие лазерного излучения с полимерными материалами

### Некоторые темы из области моделирования:

- структура и свойства металлов и шлаковых расплавов: анализ и прогноз фазовых диаграмм, моделирование термодинамических и кинетических свойств;
- разработка материалов: фазовые трансформации, диффузия на границе раздела, физические и механические свойства;
- металлургические процессы и реакции: моделирование термодинамики и кинетики металлургических реакций, фазовые взаимодействия.

ММТ-2006 Organizing Committee, College of Judea and Samaria, Ariel 44837, Israel.  
Phone: +972-3-9066217; Fax: +972-3-9066234; zinigrad@research.yosh.ac.il  
<http://www.yosh.ac.il/research//mmt/MMT-2006/mmt-2006.htm>