

На правах рукописи



Колесников Алексей Владимирович

**ПНЕВМОТЕРМИЧЕСКАЯ ФОРМОВКА ТРЁХСЛОЙНЫХ
КЛИНОВИДНЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.07.02 –

Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2015

Работа выполнена на кафедре «Самолётостроение и эксплуатация авиационной техники» ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Шмаков Андрей Константинович**,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолётостроение и эксплуатация авиационной техники»
ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Корольков Владимир Иванович**,
доктор технических наук, профессор кафедры «Самолётостроение»
ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»

Белых Сергей Викторович,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология самолетостроения»
ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Ведущая организация: ОАО «Иркутский научно-исследовательский институт авиационных технологий и организации производства»

Защита состоится «15» января 2015 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д212.092.06 при ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» www.knastu.ru

Автореферат разослан «4» декабря 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.092.06
канд. техн. наук, доцент



Д.Г. Колыхалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Перспективным направлением совершенствования технологии листовой штамповки в производстве тонкостенных многослойных конструкций из трудно-деформируемых сплавов является использование совмещенного технологического процесса диффузионной сварки и пневмотермической формовки (ПТФ/ДС) в режиме сверхпластичности. Преимуществом этой технологии является: высокая точность формуемых изделий, снижение количества деталей в конструкции, высокая деформационная способность сплавов, низкие значения силовых параметров процесса и широкие возможности беспрессовой штамповки. Освоение и практическое использование процессов ПТФ/ДС затруднено из-за недостатка теоретических и экспериментальных данных о влиянии геометрических характеристик конструкции на технологические параметры процесса формовки, а также из-за отсутствия технологической оценки формовки многослойных конструкций переменной высоты (клиновидных многослойных панелей), получаемых ПТФ/ДС.

Цель работы: исследование и разработка технологического процесса пневмотермической формовки трёхслойных клиновидных панелей в режиме сверхпластичности.

Объект исследования: технологический процесс пневмотермической формовки трёхслойных клиновидных панелей из титановых сплавов.

Предмет исследования: технологические параметры пневмотермической формовки, механика протекания процесса и конструктивно-геометрические параметры трёхслойных клиновидных панелей.

Методы исследования:

- теоретические исследования выполнены на основе положений теории пластичности с использованием основных общепринятых допущений теории листовой штамповки;

- численные экспериментальные исследования осуществлялись с использованием моделирования в программном комплексе «MSC Marc»;

- натурные эксперименты проводились с использованием прессы сверхпластической формовки и диффузионной сварки Loire «FSP 60T» французской фирмы «АСВ» и универсальной оснастки;

- измерения производились с использованием ультразвукового толщиномера «Olympus 38DL Plus» и способом фотометрии с применением классических методов обработки результатов.

Научная новизна работы:

1) установлены основные закономерности процесса пневмотермической формовки клиновидных трёхслойных конструкций в режиме сверхпластичности на основе исследования механики и особенностей процесса;

2) разработан метод определения конструктивно-геометрических параметров трёхслойных панелей, позволяющий прогнозировать условия бездефектной формовки;

3) разработана методика расчета технологических параметров пневмотермической формовки клиновидных трёхслойных панелей с учетом способа изготовления.

Практическая ценность работы:

1) разработано программное обеспечение для расчёта технологических параметров пневмотермической формовки трёхслойных клиновидных панелей из титановых сплавов на стадии свободной формовки заполнителя;

2) разработан алгоритм выбора способа изготовления трёхслойных клиновидных панелей в зависимости от параметров гофрированного заполнителя;

3) определены свойства сверхпластичности титановых сплавов;

4) сформулированы рекомендации по проектированию оснастки.

Реализация работы:

Результаты работы нашли практическое применение в исследовательской работе по договору между ФГБОУ ВПО «ИрГТУ» и ОАО «Научно-производственной корпорацией «ИРКУТ» от 27 августа 2010 г. № 334/10 «Разработка и внедрение комплекса высокоэффективных технологий проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолета МС-21» по теме № 16: «Разработка и внедрение технологических процессов формообразования тонколистовых деталей летательных аппаратов из трудно-деформируемых материалов в режиме сверхпластичности».

Результаты работы используются в учебном процессе и для повышения квалификации специалистов авиационной отрасли в ИрГТУ.

Личный вклад соискателя: все основные теоретические положения и экспериментальные исследования в диссертации выполнены соискателем лично. Соискатель самостоятельно проводил моделирование и обрабатывал полученные результаты.

Апробация работы: результаты работы докладывались на 11-и научно-технических конференциях.

Публикации: основное содержание работы изложено в 9 научных статьях. Из них 6 в изданиях из перечня ВАК.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов и трёх приложений. Полный объём работы составляет 215 страниц, в том числе основной текст 180 страниц, 114 рисунков и 13 таблиц, списка литературы (114 наименования, 10 страниц).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы. Сформулирована цель исследования, изложена научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** описан мировой опыт изготовления многослойных конструкций различного назначения методом ПТФ/ДС. Дано описание общей характеристики процесса ПТФ/ДС многослойных панелей в режиме сверхпластичности. Рассмотрены наиболее распространённые технологические схемы изготовления многослойных конструкций методом ПТФ/ДС. Представлена методика определения технологических параметров для реализации процесса пневмотермической формовки плоскопараллельных многослойных панелей. Описаны основные стадии пневмотермической формовки многослойных панелей с различными конструктивно-геометрическими параметрами заполнителя.

Выявлена недостаточность теоретических и экспериментальных исследований по определению параметров формовки многослойных конструкций переменной высоты, таких как клиновидные панели.

Определена цель исследования. Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи исследования**:

1) теоретический анализ процесса ПТФ/ДС клиновидных трёхслойных панелей с целью выявления особенностей и закономерностей, определяющих технологические параметры (давления и времени) формовки трёхслойных клиновидных панелей с различным расположением заполнителя;

2) выявление причин возникновения дефектов (утяжин) в трёхслойных клиновидных панелях в процессе пневмотермической формовки и определение условий их бездефектного изготовления;

3) определение технологических параметров пневмотермической формовки трёхслойных клиновидных панелей с подпором обшивок;

4) экспериментальное исследование с целью проверки результатов теоретического исследования;

5) разработка рекомендаций по практическому освоению процесса ПТФ/ДС трёхслойных клиновидных конструкций.

Во **второй** главе решена задача определения закона изменения давления во времени $p = f(\tau)$ на стадии свободной формовки многослойной клиновидной панели на основе анализа процесса формообразования заполнителя. На рис. 1 приведена расчетная схема процесса, согласно которой образование ребер гофра заполнителя происходит под действием силы P_{nj} за счёт растяжения участков a_j листа заполнителя, не сваренных ни с одной из обшивок.

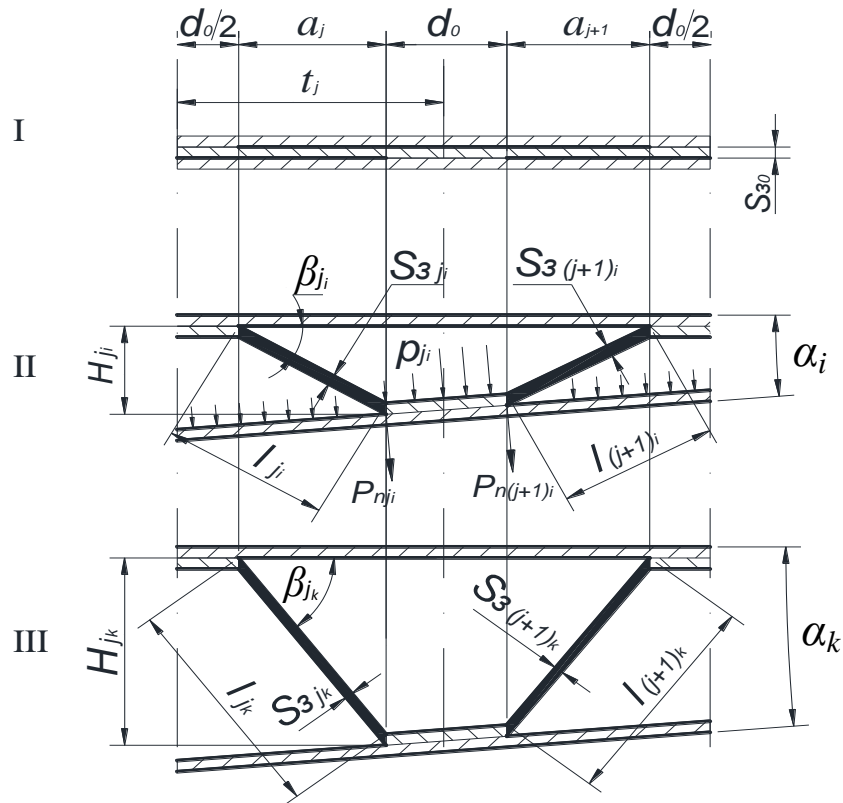


Рисунок 1 – Расчётная схема образования ребер гофра заполнителя с учётом зон диффузионной сварки

Сила P_{nj} при формовке обшивок создаётся давлением p_j и определяется как

$$P_{n_{ji}} = p_{ji} \cdot M_j, \quad (1)$$

где p_{ji} – давление формующего газа на i -ом этапе; $M_j = (t_j \cdot L_{\Pi}) / \cos \alpha_i$, – площадь зоны действия давления, формующего ребро гофра заполнителя; $t_j = a_j + d_0$ – шаг j -го ребра гофра; L_{Π} – длина гофра панели; α_i – угол клиновидности панели.

Под действием давления газа происходит удлинение участков l_j от первоначальной длины a_j до конечной длины ребра гофра l_{jk} , с одновременным изменением угла наклона ребер к поверхности верхней обшивки от начального значения $\beta_j = 0$ до заданного значения β_{jk} .

Для расчёта принимается:

- прогиб участков нижнего листа между сварными участками не учитывается;
- материал зон диффузионной сварки не деформируется в процессе формовки заполнителя, так как соединён с внешними листами;
- изменение толщины ребра гофра по очагу деформации принимается равномерной.

Расчёт давления формовки p_j выполнен с учетом условия равновесия сил на границе очага деформации при проецировании их на ось, вертикальную перемещению нижней обшивки, с учётом геометрических соотношений клиновидной панели:

$$p_{j_i} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{t_j} \sin 2 \beta_{j_i}, \quad (2)$$

где σ_{S_3} – напряжение течения материала заполнителя в режиме сверхпластичности; S_{30} – исходная толщина заполнителя; $\bar{H}_{j_i} = H_{j_i}/a_j$ – относительная высота j -го ребра гофра на i -ом этапе расчёта.

Давление формовки для каждого ребра гофра определяется по формуле

$$p_{j_i} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{a_j + d_0} \right) \left(\frac{\bar{H}_{j_i}}{1 + \bar{H}_{j_i}^2} \right). \quad (3)$$

Из условия постоянства скорости деформации $\frac{d\varepsilon}{d\tau} = const$, время формовки τ_j для j -го ребра заполнителя определяется выражением

$$\tau_{j_i} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\dot{\varepsilon}_e} \ln(\cos \beta_{j_i}), \quad (4)$$

где $\dot{\varepsilon}_e$ – скорость деформации заполнителя в режиме сверхпластичности.


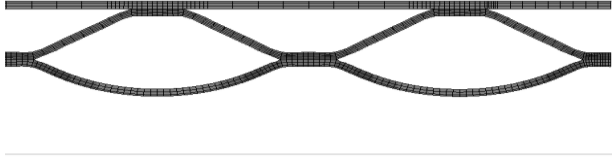
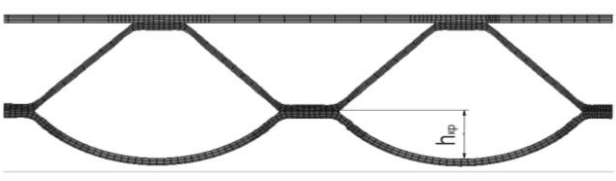
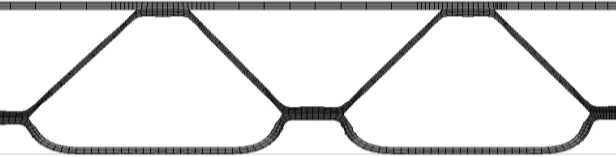
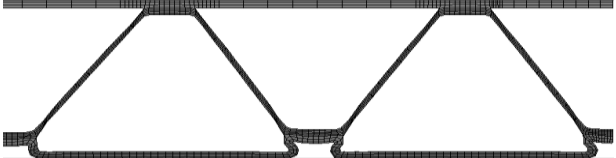
Выражения (3) и (4) являются исходными для расчёта кривой изменения давления формовки заполнителя по ходу процесса. Прямая зависимость давления по времени формовки $p(\tau)$ имеет вид

$$p_{j_i} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{a_j + d_0} \right) \frac{\sqrt{e^{\sqrt{3}\dot{\varepsilon}_e\tau_{j_i}} - 1}}{e^{\sqrt{3}\dot{\varepsilon}_e\tau_{j_i}}}. \quad (5)$$

Опыт изготовления многослойных панелей показывает, что в определённых условиях возникают дефекты, называемые утяжинами. Виртуальное моделирование процесса формовки многослойной панели с закреплённой верхней обшивкой в программном комплексе «MSC Marc» показало, что при посадке прогибов больше некоторой величины, которую можно назвать критической, происходит возникновение утяжин (табл. 1). Пара-

метрами, определяющими возможность возникновения утяжин, являются: соотношение исходных толщин обшивки и заполнителя $S_0/S_{з0}$, высота прогиба обшивки h_ρ и ширина прогиба b_ρ .

Таблица 1 – Моделирование образования утяжин в процессе формовки панели

№	Процесс формообразования панели	Этапы
1		Начало формовки
2		Свободная формовка панели
3		Формирование прогиба нижней обшивки критической высоты в ходе свободной формовки
4		Оформление нижней обшивки, посадка прогиба
5		Окончание формовки, образование утяжин

Высота критического прогиба $h_{\rho_{кр}}$ характеризуется коэффициентом критического прогиба $q_{кр}$, который определяется зависимостью

$$q_{кр} = \frac{h_{\rho_{кр}}}{b_\rho/2} / \left[1 + \left(\frac{h_{\rho_{кр}}}{b_\rho/2} \right)^2 \right], \quad (6)$$

где $h_{\rho_{кр}}$ – высота критического прогиба; b_ρ – ширина рифта.

Бездефектная формовка многослойной панели возможна, когда давление, необходимое для формовки ребер заполнителя и обшивки, будет меньше давления, при котором прогиб обшивки h_ρ в неподкреплённых ребрами местах достигает критического значения, т. е.:

$$p_{max} < p_0, \quad (7)$$

где p_{max} – максимальное давление, необходимое для формовки многослойной панели с соблюдением режима сверхпластичности; p_0 – давление формовки обшивки в неподкреплённых ребрами местах, приводящее к критическому значению прогиба.

Для определения максимального давления необходимо учесть концевую зону панели (рис. 2), где происходит формовка обшивки, толщина которой может быть в несколько раз больше толщины заполнителя.

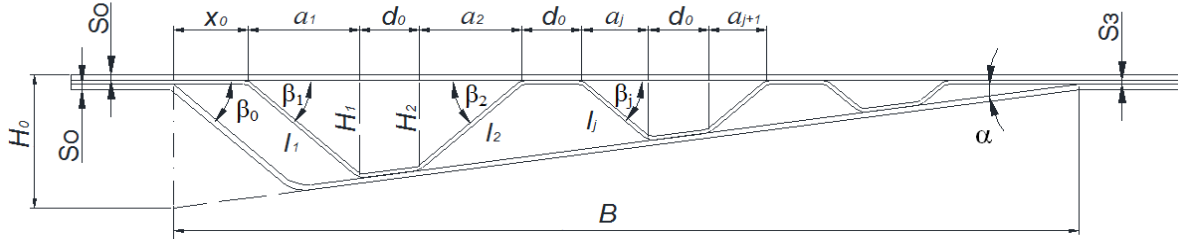


Рисунок 2 – Сечение клиновидной трехслойной панели

Расчёт нагружения выполняется при условии равновесия сил, спроецированных на вертикальную ось:

$$p_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{nS_{30} + S_0}{B} \right) \frac{\bar{H}_i}{1 + \bar{H}_i^2}, \quad (8)$$

где S_0 – исходная толщина обшивки; B – ширина зоны формовки.

Ширина зоны формовки определяется выражением

$$B = x_0 + \sum_j^n a_j + n \cdot d_0, \quad (9)$$

где a_j – первоначальная длина j -го ребра; x_0, d_0 – ширина зон диффузионной сварки.

Давление, действующее на обшивку в неподкреплённых ребрами местах, определяется зависимостью

$$p_0 = \frac{8}{\sqrt{3}} \sigma_s \frac{S_0}{e^{\frac{\ln(1+\bar{H}_j^2)}{2}} b_\varrho} q_{кр}. \quad (10)$$

Из уравнения (7) с использованием (8) и (10) определяется рекомендуемый диапазон соотношения толщин обшивки и заполнителя в зависимости от конструктивных параметров панели

$$\frac{S_0}{S_{30}} > \frac{n \cdot b_\varrho \cdot \left(\frac{\bar{H}_j}{1 + \bar{H}_j^2} \right) \cdot e^{\frac{\ln(1+\bar{H}_j^2)}{2}}}{4 \cdot q_{кр} \cdot B - 2 \left(b_\varrho \cdot \left(\frac{\bar{H}_j}{1 + \bar{H}_j^2} \right) \cdot e^{\frac{\ln(1+\bar{H}_j^2)}{2}} \right)}. \quad (11)$$

Диапазон соотношения толщин, рассчитанный из условия (11) снижает применимость метода ПТФ/ДС для изготовления многослойных конструкций. Поэтому при формовке без соблюдения условия (11) необходимы дополнительные меры для предотвращения дефектов, к которым относятся:

- использование технологических листов;

- укрупнение зерна микроструктуры обшивки предварительной термообработкой;
- применение подвижного элемента оснастки.

Технологический лист из того же материала, что и обшивка (рис. 3), формируясь совместно с ней, поддерживает её наружную поверхность и уменьшает величину выпучивания.

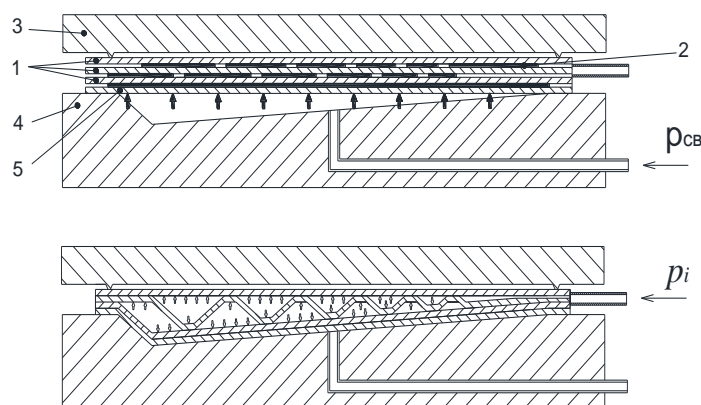


Рисунок 3 – Схема формовки клиновидной трёхслойной панели с технологическим листом:

- 1 – листы многослойной панели; 2 – антисварочное покрытие;
3 – верхняя крышка оснастки; 4 – нижняя часть оснастки;
5 – технологический лист

Предварительная термообработка наружной обшивки для увеличения размера зерна, приводит к увеличению сопротивления деформированию и, как следствие, уменьшению высоты выпучивания.

Схема процесса ПТФ/ДС клиновидной многослойной панели с подвижным элементом оснастки представлена на рис. 4.

Подпорную плиту 5 с механическим приводом 6 необходимо отклонять относительно оси 7 с угловой скоростью, обеспечивающей постоянство скорости деформации ребер заполнителя, определяемой выражением

$$\omega_i = \frac{\sqrt{3} \cdot \dot{\varepsilon}_e}{\ln\left(1 + \frac{(2i+1)(\Delta\bar{H}_i)^2}{1+(i\Delta\bar{H}_i)^2}\right)} \cdot \arctg\left(\frac{\Delta\bar{H}_i}{\left(\frac{B-x_0}{a_1} - 1\right)}\right). \quad (12)$$

где a_1 – первоначальная длина первого ребра заполнителя.

В случае использования подпорной плиты с механическим управлением внутрь панели можно подавать постоянное максимальное давление формовки p_k , которое определяется из условия (8) при $\bar{H}_j = 1$.

$$p_k = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{nS_{30} + S_0}{B} \right). \quad (13)$$

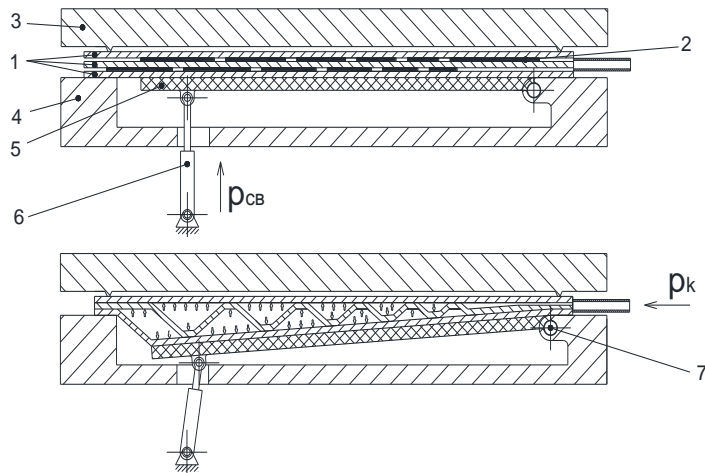


Рисунок 4 – Схема формовки клиновидной трёхслойной панели с механическим управлением подпорной плитой:

- 1 – листы многослойной панели; 2 – антисварочное покрытие;
 3 – верхняя крышка оснастки; 4 – нижняя часть оснастки;
 5 – подпорная плита; 6 – механический привод;
 7 – ось вращения подпорной плиты

Для поворота подпорной плиты может служить противодействие p_{pri} , удерживающее подпорную плиту у обшивки, не допуская её прогиб, как показано на рис. 5.

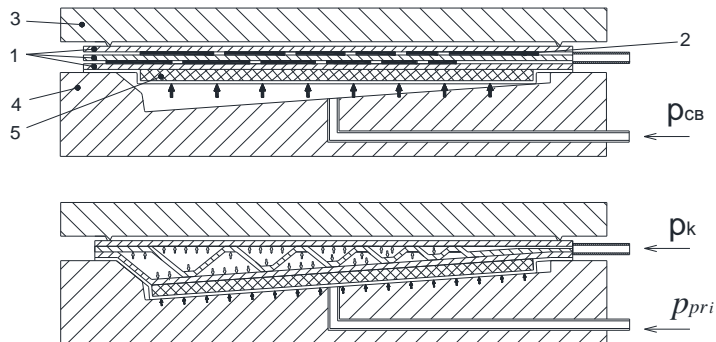


Рисунок 5 – Схема формовки клиновидной трёхслойной панели с подпорной плитой, управляемой противодавлением:

- 1 – листы многослойной панели; 2 – антисварочное покрытие;
 3 – верхняя крышка оснастки; 4 – нижняя часть оснастки;
 5 – подпорная плита

Значение противодействия газа p_{pri} определяется из условия

$$p_{pri} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{nS_{30} + S_0}{B} \right) \left(\frac{1}{2} - \frac{\bar{H}_i}{1 + \bar{H}_i^2} \right). \quad (14)$$

В главе 3 определены значения коэффициента критического прогиба. Для определения условий деформирования, при которых образуются утяжины в процессе формовки трехслойной панели (рис. 6 а), рассмотрен процесс посадки рифта, имеющего высоту, равную критическому значению прогиба, подвижным элементом оснастки (рис. 6 б). Значение критической высоты рифта определено моделированием процесса в программном комплексе MSC «Marc».

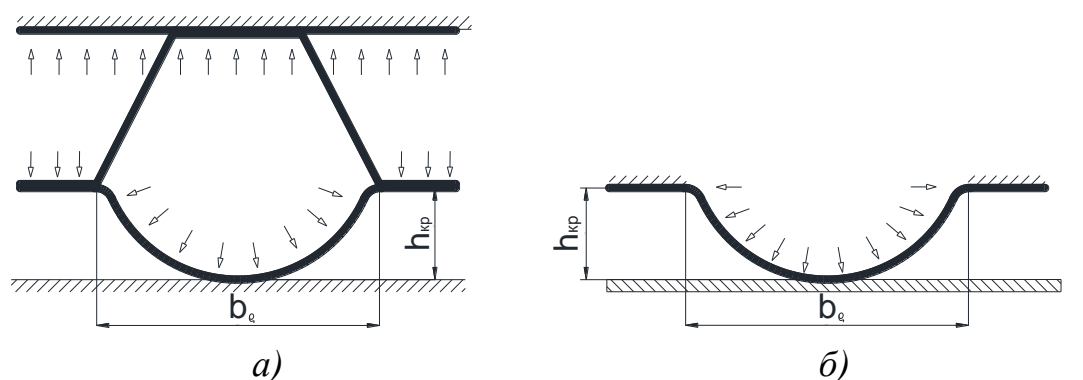


Рисунок 6 – Схема посадки отформованного прогиба нижней обшивки:
 а) посадка критического прогиба обшивки; б) посадка отформованного рифта

В табл. 2 представлена последовательность формирования утяжины при посадке формирующегося рифта из титанового сплава ВТ20, полученная в результате моделирования.

Таблица 2 – Моделирование формирования утяжины при посадке рифта

Стадии процесса	Процесс посадки формирующегося рифта
Исходное положение	
Начало формовки, появление прогиба	
Формирование прогиба критического значения	
Посадка прогиба и формирование складки	
Образование утяжины	

В результате моделирования определены значения высоты и коэффициента критического прогиба рифта из титанового сплава ВТ20 по формуле (6) в зависимости от ширины рифта b_0 и толщины обшивки S_0 , представленные на рис. 7–8, определяющие область возможной бездефектной формовки. Обозначения на рис. 7–8: 1 – $S_0 = 1$ мм; 2 – $S_0 = 1,5$ мм; 3 – $S_0 = 2$ мм; 4 – $S_0 = 2,5$ мм; 5 – $S_0 = 3$ мм.

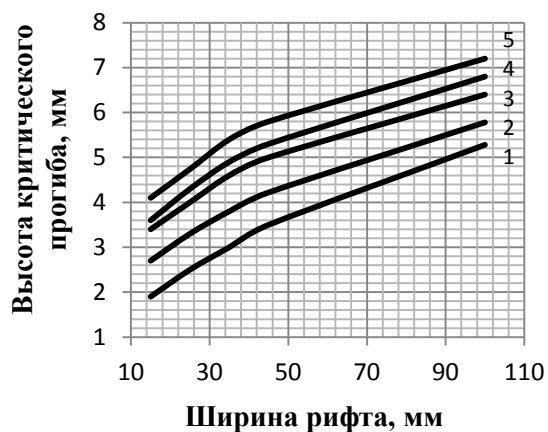


Рисунок 7 – Изменение высоты критического прогиба от ширины рифта

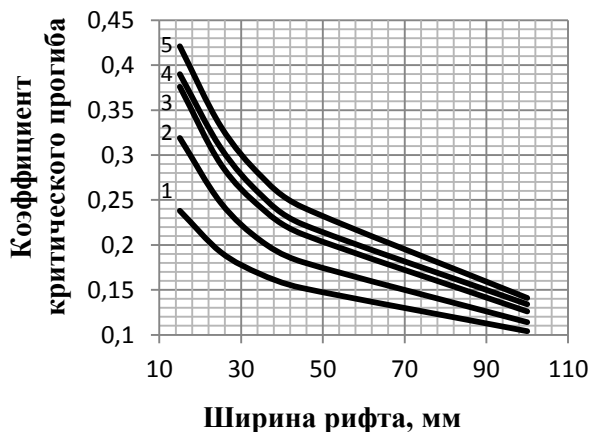


Рисунок 8 – Изменение коэффициента критического прогиба от ширины рифта

Зависимость соотношения толщин обшивки и заполнителя (S_0/S_{30}) от относительной высоты панели \bar{H}_j (рис. 9) с учетом коэффициента критического прогиба, определённого по диаграмме на рис. 8, построена для толщины обшивок $S_0 = 2$ мм, ширины гофра $b_0 = 25$ мм (равной ширине рифта), с учётом количества ребер $n = 14$ и ширины зоны формовки равной $B = 220$ мм. Выше полученной кривой находится рекомендуемый диапазон выбора соотношения толщин S_0/S_{30} , при котором произойдет формовка панели без формирования утяжин.

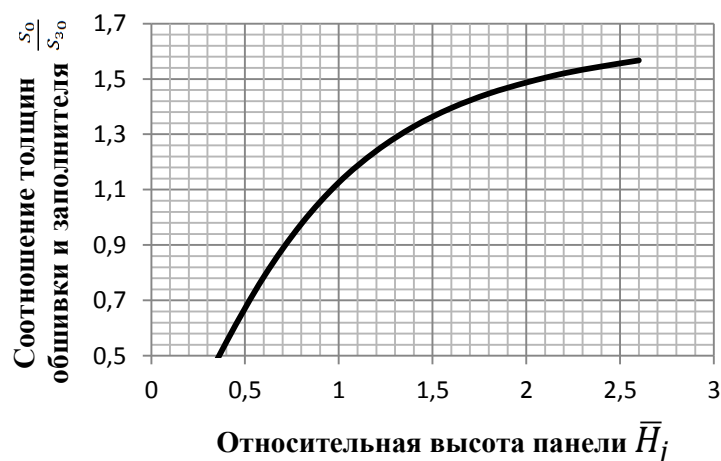


Рисунок 9 – Диапазон выбора соотношения толщин в зависимости от относительной высоты панели

Для многослойной панели с относительной высотой $\bar{H} = 1,8$ рекомендуемое соотношение толщин составляет $S_0/S_{30} > 1,45$, принято значение $S_0/S_{30} = 2$, тогда рекомендуемая толщина заполнителя $S_{30} = 1$ мм.

Для проверки достоверности разработанных методик по полученным геометрическим параметрам выполнены формовки клиновидных панелей с продольным и поперечным гофровыми наборами, представленные на рис. 10–11.

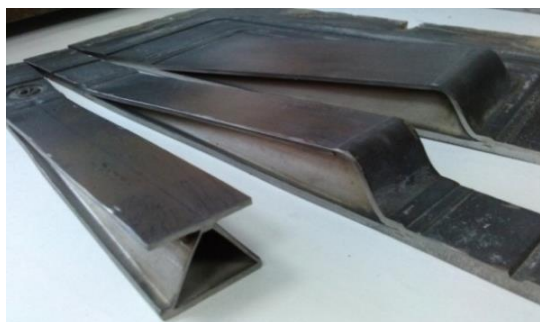


Рисунок 10 – Клиновидная панель с продольным гофром



Рисунок 11 – Клиновидная панель с поперечным гофром

После формовки все клиновидные панели соответствовали расчётным параметрам по размерам сечения профиля. Формовка осуществлена без образования дефектов, что подтверждает правильность определения параметров клиновидных панелей и режимов формовки. Металлографический анализ, проведённый после изготовления клиновидных панелей, не выявил значительных изменений в микроструктуре металла.

В процессе обработки результатов экспериментальных работ получены данные о распределении толщины заполнителя при различных значениях относительных высот клиновидных панелей, представленные на рис. 12–13.

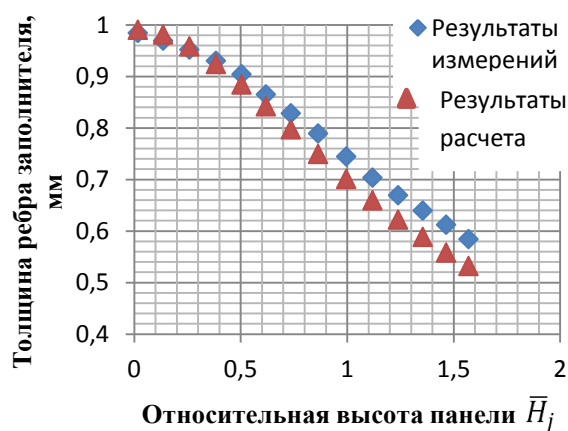


Рисунок 12 – Сравнение результатов измерения и расчёта толщины заполнителя панели с продольным гофром

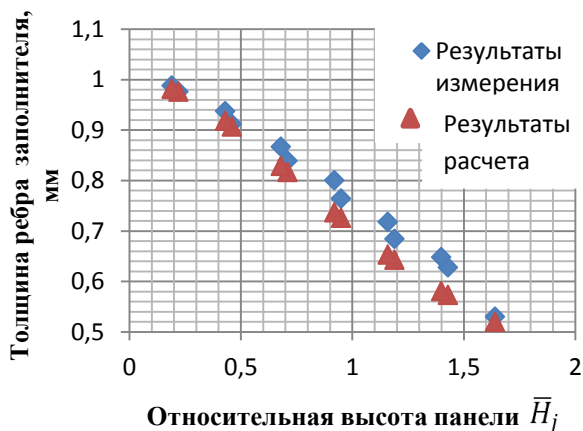


Рисунок 13 – Сравнение результатов измерения и расчёта толщины заполнителя панели с поперечным гофром

Сходимость значения толщины, полученной в результате расчёта и эксперимента, ухудшается с увеличением относительной высоты панели с максимальным расхождением 9 %, что говорит о применимости методики для расчёта параметров формовки многослойных клиновидных конструкций.

В главе 4 определены свойства сверхпластичности титанового сплава ОТ4-1 по методике испытаний на двухосное растяжение. Графики зависимостей напряжения течения и коэффициента скоростного упрочнения от скорости деформации сплава в логарифмической системе координат представлены на рис. 14–15.

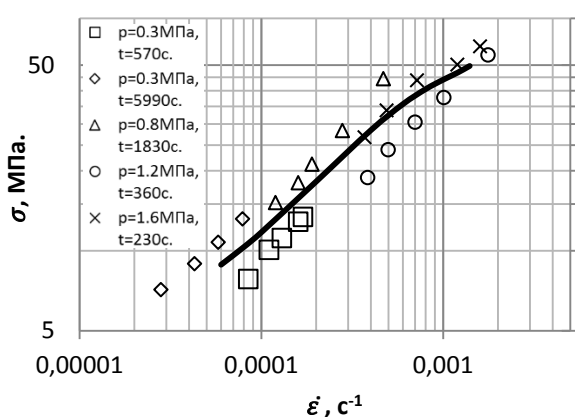


Рисунок 14 – График зависимости $\sigma_k = f(\dot{\epsilon}_k)$

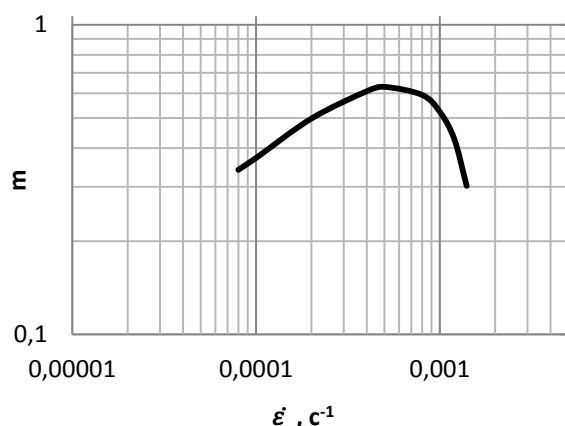


Рисунок 15 – График зависимости $m = f(\dot{\epsilon}_k)$

Свойства сверхпластичности титанового сплава ОТ4-1, определённые из данных по испытаниям, и других титановых сплавов, приведены в табл. 3. Свойства сверхпластичности использованы для определения технологических параметров формовки трехслойных панелей.

Таблица 3 – Свойства сверхпластичности титановых сплавов

Материал	t, °C	σ_s , МПа	$\dot{\epsilon} \cdot 10^{-3}$, с ⁻¹	m
ОТ4-1	890	28	0,4	0,64
BT6	900	21	0,33	0,37
BT20	950	40	1,6	0,42

Предложены зависимости определения переменного шага ребер заполнителя, обеспечивающего постоянство степени деформации каждого ребра панели. По графикам на рис. 16–17, в зависимости от заданной доли k от

допустимой деформационной способности материала при растяжении δ_{max} , принятой исходя из ограничения величины утонения, определяется отношение первоначальной длины ребра к конечной и относительная высота панели. Обозначения на рис. 16–17: 1 – для ОТ4-1 ($\delta_{max} = 150\%$); 2 – для ВТ20 ($\delta_{max} = 300\%$).

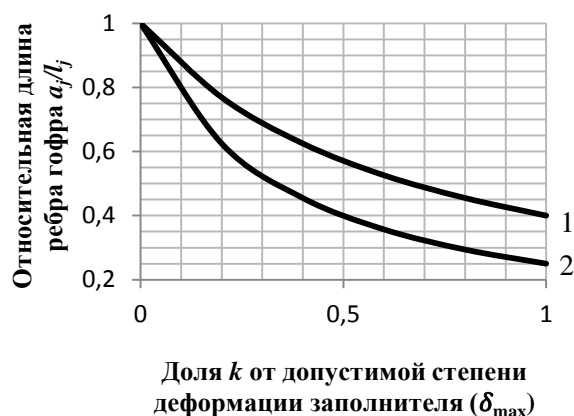


Рисунок 16 – Зависимость относительной длины ребра от степени деформации

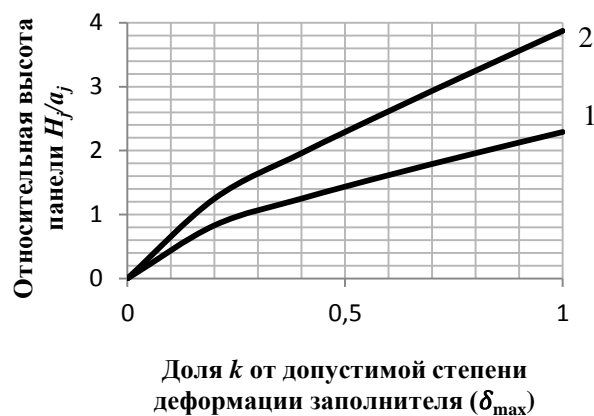


Рисунок 17 – Зависимость относительной высоты панели от степени деформации

По разработанным в работе рекомендациям, изготовлена гипотетическая конструкция трёхслойной клиновидной панели с переменным шагом поперечно-расположенных ребер равной толщины, представленная на рис. 18.



Рисунок 18 – Разрез трёхслойной клиновидной панели с переменным шагом ребер из сплава ОТ4-1

Разработаны рекомендации по проектированию технологической оснастки под технологию ПТФ/ДС. С учётом рекомендаций разработана и спроектирована оснастка для проведения экспериментальных исследований формовки многослойных панелей и других конструкций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В результате исследования основных закономерностей процесса пневмотермической формовки клиновидных многослойных конструкций в режиме сверхпластичности выведены зависимости для определения давления и времени на стадии свободной формовки заполнителя, а также разработана программа для построения графика зависимости давления от времени формовки.

2. Установлены причины возникновения дефектов (утяжин), недопустимых на аэродинамических поверхностях конструкций летательных аппаратов. Разработана методика определения диапазона конструктивно-геометрических параметров клиновидных панелей, обеспечивающих формовку без образования утяжин.

3. Для конструктивных параметров панелей, выходящих за пределы рекомендуемого диапазона, предложено проведение формовки с подпором (поддержкой) обшивки, с применением подвижной плиты, перемещающейся механическим путем, либо управляемой противодавлением. Выведены зависимости для определения параметров формовки клиновидных панелей с применением подвижной плиты.

4. Рекомендовано изготовление клиновидных панелей с переменным шагом ребер заполнителя, обеспечивающим постоянство относительной высоты панели и позволяющим изготавливать их с постоянной толщиной заполнителя.

5. Результаты теоретического расчёта толщины ребер заполнителя после пневмотермической формовки панелей совпадают с экспериментальными значениями толщин ребер, измеренных на изготовленных образцах. Отклонения расчётных значений толщин и измеренных на образцах не превышают 10 %.

6. Выведены расчётные зависимости для определения параметров ребер заполнителя (высоты, длины и шага ребра) для изготовления панелей с заданной степенью деформации, которая обеспечит получение требуемых значений толщин ребер.

7. При выполнении опытных работ, с использованием результатов теоретического и экспериментального исследований, получены образцы клиновидных трёхслойных панелей с заданной степенью деформации заполнителя.

8. Получены свойства сверхпластичности титановых сплавов по методике испытаний на двухосное растяжение.

9. Проведенные металлографические исследования свидетельствуют о незначительных изменениях в микроструктуре образцов после ПТФ/ДС, что обеспечивает неизменность механических свойств титановых сплавов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Горленко А.М., Пашкевич А.Г., Колесников А.В., Унагаев Е.И. Пневмотермическая формовка тонкостенных элементов пневмогидросистем // *Авиационная промышленность*. – М. – 2011. – № 4. – С. 24–26.
2. Мироненко В.В., Колесников А.В., Максименко Н.В., Станиславчик А.С., Котов В.В. Пневмотермическая формовка в режиме сверхпластичности рифтовых конструкций из листа // *Металлург*. – М. – 2013. – № 9. – С. 50–54.
3. Колесников А.В., Шмаков А.К. Пневмотермическая формовка трёхслойных клиновидных панелей с подпором обшивок // *Вестник ИрГТУ*. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2013. – № 11 (82). – С. 52–57.
4. Колесников А.В., Мироненко В.В., Чеславская А.А., Шмаков А.К. Оптимизация технологических процессов изготовления деталей из листа средствами виртуального технологического моделирования // *Вестник ИрГТУ*. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2013. – № 12 (83). – С. 73–77.
5. Бердин В.К., Бердин Н.В., Лукьянов В.В., Колесников А.В. Моделирование сверхпластической формовки многослойных ячеистых конструкций в программном комплексе ABAQUS // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. – М. – 2014. – № 1. – С. 32–38.
6. Колесников А.В. Предотвращение возникновения дефектов в процессе пневмотермической формовки трёхслойных панелей из титановых сплавов // *Вестник МАИ*. – М. – 2014. – Т. 21. – № 2. – С. 66–74.

В других изданиях:

7. Горленко А.М., Шмаков А.К., Колесников А.В. Опыт внедрения и перспективы применения технологических процессов формообразования тонколистовых деталей л. а. из труднодеформируемых материалов в режиме сверхпластичности в авиастроении // *Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолётов : мат-лы Всерос. с междунар. участием науч.-практ. семинара / под общ. ред. А.Е. Пашкова*. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2011. – С. 121–129.
8. Колесников А.В., Станиславчик А.С. Моделирование процесса изготовления деталей из титановых сплавов в режиме сверхпластичности // *Высокоэффективные технологии производства летательных аппаратов : сб. докладов / под общ. ред. А.Ю. Дяка*. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2012. – С. 100–110.
9. Колесников А.В. Анализ возможности пневмотермической формовки многослойных конструкций методом виртуального моделирования // *Решетневские чтения : мат-лы XVI Междунар. науч. конф., посвященной памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева; в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова*. – Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2012. – Ч. 2. – С. 361–363.

Подписано в печать 19.11.2014. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Зак. 227. Поз. плана 12н.

Лицензия ИД № 06506 от 26.12.2001
Иркутский государственный технический университет
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83