

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

Иркутск – 2014

Работа выполнена на кафедре «Самолётостроения и эксплуатации авиационной техники» Иркутского государственного технического университета (ФГБОУ ВПО «ИрГТУ»).

Научный руководитель:

Шмаков Андрей Константинович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолётостроения и эксплуатации авиационной техники» Иркутского государственного технического университета (ФГБОУ ВПО «ИрГТУ»).

Официальные оппоненты:

Корольков Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры «Самолетостроение» Воронежского государственного технического университета (ФГБОУ ВПО «ВГТУ»)

Белых Сергей Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета» (ФГБОУ ВПО «КнАГТУ»)

Ведущая организация:

ОАО «Иркутский научно-исследовательский институт авиационных технологий и организации производства» (ОАО «Иркутский НИАТ»)

Защита состоится «___» января 2014 г. в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета Д212.092.06 при Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете (ФГБОУ ВПО «КнАГТУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27.

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

Автореферат разослан «___» декабря 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.092.06
к.т.н., доцент

Д.Г. Колыхалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из перспективных направлений 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 типовых 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 пресса сверхпластической формовки и диффузионной сварки «FSP 60T» и универсальной оснастки;
- измерения производились с использованием ультразвукового толщинометра «Olympus 38DL Plus» и способом фотометрии с применением стандартных 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 трехслойных панелей с учетом способа изготовления.

Практическая ценность работы:

- 1) разработана программа 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 гофрового заполнителя;
- 3) определены свойства сверхпластичности титановых сплавов;
- 4) сформулированы рекомендации по проектированию оснастки.

Результаты работы внедрены на Иркутском авиационном заводе, филиале ОАО Научно-производственной корпорации «ИРКУТ».

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 2010г. № 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-ти 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.

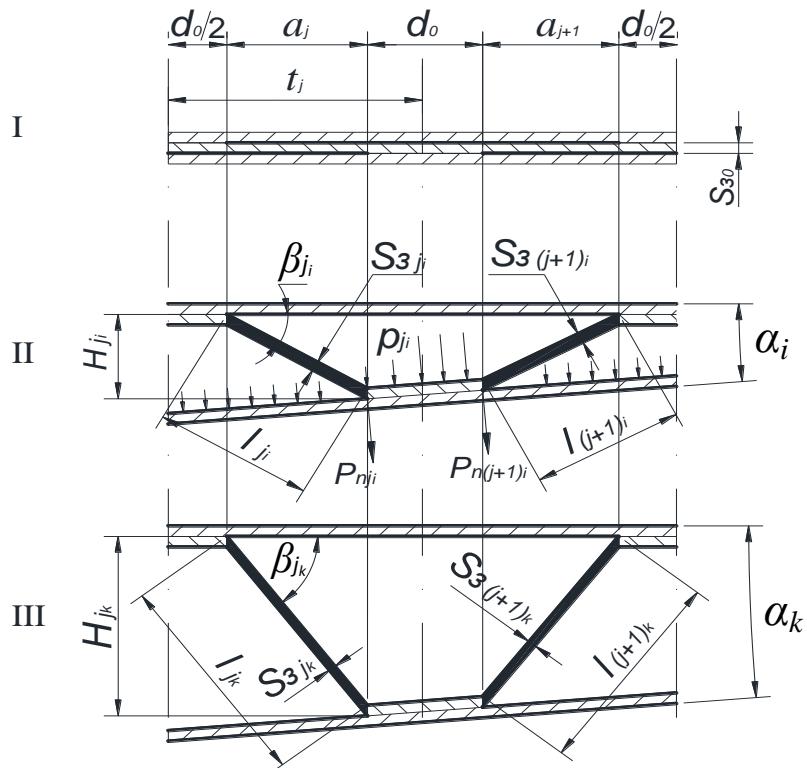
Выявлена недостаточность теоретических и экспериментальных исследований по определению параметров формовки многослойных конструкций переменной высоты, таких как клиновидные панели.

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 $p=f(t)$ на стадии свободной формовки многослойной клиновидной панели на основе анализа процесса формообразования заполнителя. На рисунке 1 приведена расчётная 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.



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

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

где p_{j_i} – 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_{j_k} , с одновременным изменением угла наклона ребер к поверхности верхней обшивки от начального значения $\beta_j = 0$ до заданного значения β_{j_k} .

Для расчёта принимается:

- прогиб участков нижнего листа между сварными участками не учитывается;
- материал зон диффузионной сварки не деформируется в процессе формовки заполнителя, т.к. 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:

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

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 (таблица 1).

Таблица 1 – Образование утяжин в процессе формообразования панели по результатам моделирования

№	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

Параметрами, определяющими возможность возникновения утяжин, являются: соотношение исходных толщин обшивки и заполнителя S_0/S_{30} , высота прогиба обшивки h_ϱ и ширина прогиба b_ϱ .

Высота критического прогиба $h_{q_{kp}}$ характеризуется коэффициентом критического прогиба q_{kp} , который определяется зависимостью:

$$q_{kp} = \frac{h_{q_{kp}}}{b_q/2} / \left[1 + \left(\frac{h_{q_{kp}}}{b_q/2} \right)^2 \right], \quad (6)$$

где $h_{q_{kp}}$ – высота критического прогиба; b_q – ширина рифта.

Бездефектная формовка многослойной панели возможна, когда давление, необходимое для формовки ребер заполнителя и обшивки будет меньше давления, при котором прогиб обшивки h_q , 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 (рисунок 2), где происходит формовка обшивки, толщина которой может быть в несколько раз больше толщины заполнителя.

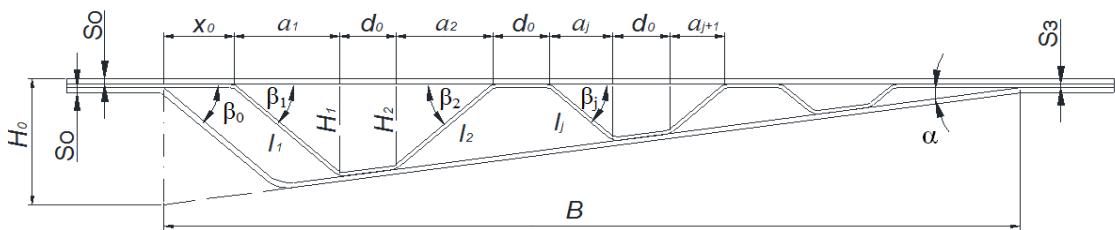


Рисунок 2 – Сечение клиновидной трехслойной панели

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

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

где S_o – 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:

$$p_0 = \frac{8}{\sqrt{3}} \sigma_S \frac{s_0}{e^{\frac{\ln(1+\bar{H}_j^2)}{2}} b_Q} q_{kp}. \quad (10)$$

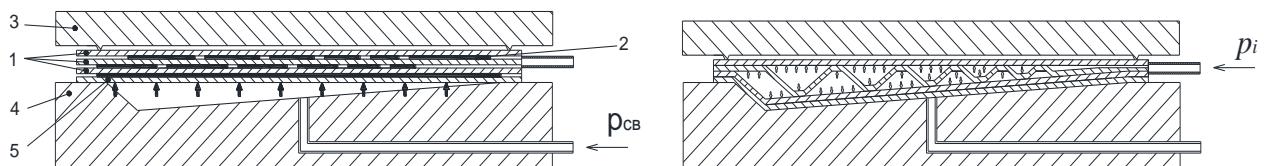
Из уравнения (7) с использованием (8) и (10) определяется рекомендуемый диапазон соотношения толщин обшивки и заполнителя в зависимости от конструктивных параметров панели:

$$\frac{s_0}{s_{30}} > \frac{n \cdot b_Q \left(\frac{\bar{H}_j}{1+\bar{H}_j^2} \right) \cdot e^{\frac{\ln(1+\bar{H}_j^2)}{2}}}{4 \cdot q_{kp} \cdot B - 2 \left(b_Q \left(\frac{\bar{H}_j}{1+\bar{H}_j^2} \right) \cdot e^{\frac{\ln(1+\bar{H}_j^2)}{2}} \right)}. \quad (11)$$

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 (рисунок 3), формуясь совместно с ней, поддерживает её наружную поверхность и уменьшает величину выпучивания.

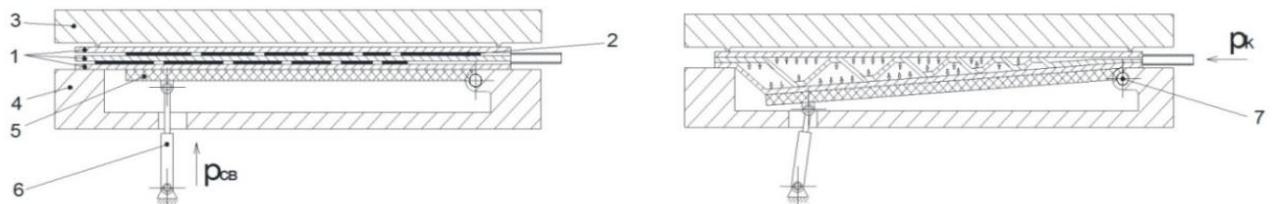


1 – листы многослойной панели; 2 – антисварочное покрытие; 3 – верхняя крышка оснастки; 4 – нижняя часть оснастки; 5 – технологический лист

Рисунок 3 - Схема формовки клиновидной трёхслойной панели с технологическим листом

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 рисунке 4.



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

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

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

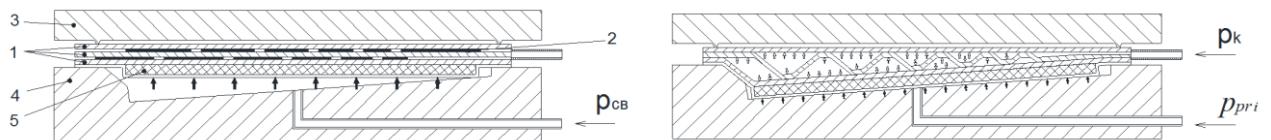
$$\omega_i = \frac{\sqrt{3} \cdot \dot{\varepsilon}_e}{\ln \left(1 + \frac{(2i+1) (\Delta \bar{H}_i)^2}{1 + (i \Delta \bar{H}_i)^2} \right)} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{\frac{\Delta \bar{H}_i}{(\frac{(B-x_0)}{a_1} - 1)}}{\left(\frac{(B-x_0)}{a_1} - 1 \right)} \right). \quad (12)$$

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 $\bar{H}_j = 1$.

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

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



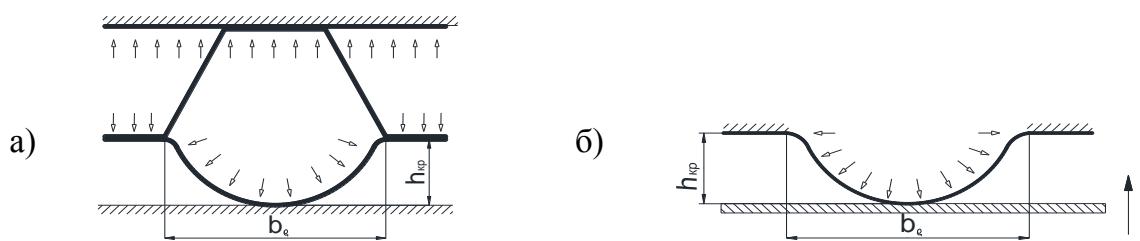
1 – листы многослойной панели; 2 – антисварочное покрытие; 3 – верхняя крышка оснастки; 4 – нижняя часть оснастки; 5 – подпорная плита

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

Значение противодавления газа p_{pr_i} определяется из условия:

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

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



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

В таблице 2 представлена последовательность формирования утяжины при посадке формующегося рифта из титанового сплава BT20, полученная в результате моделирования.

Таблица 2 – Формирование утяжины при посадке рифта по результатам моделирования

Стадии процесса	Процесс посадки формующегося 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_q и толщины обшивки S_0 , представленные на рисунке 7 и 8, определяющие область возможной бездефектной формовки.

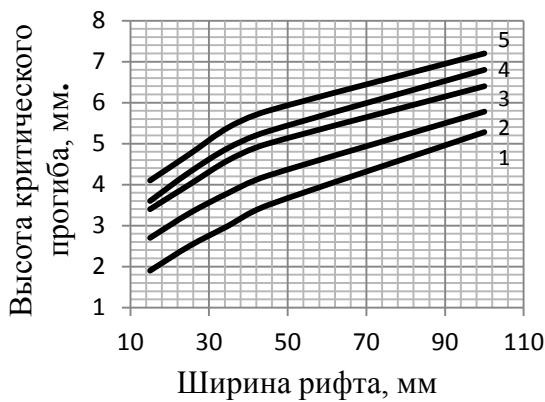


Рисунок 7 – Изменение высоты критического прогиба от ширины рифта

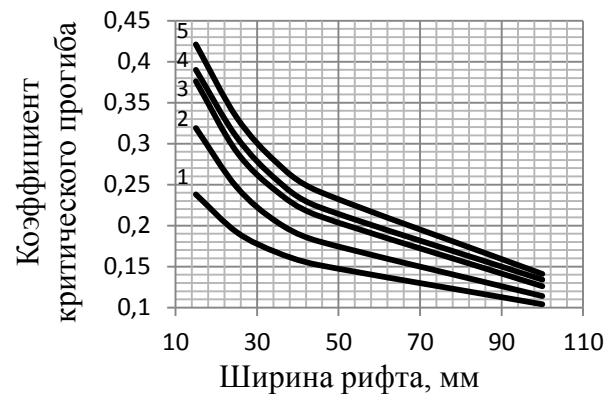


Рисунок 8 – Изменение коэффициента критического прогиба от ширины рифта

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

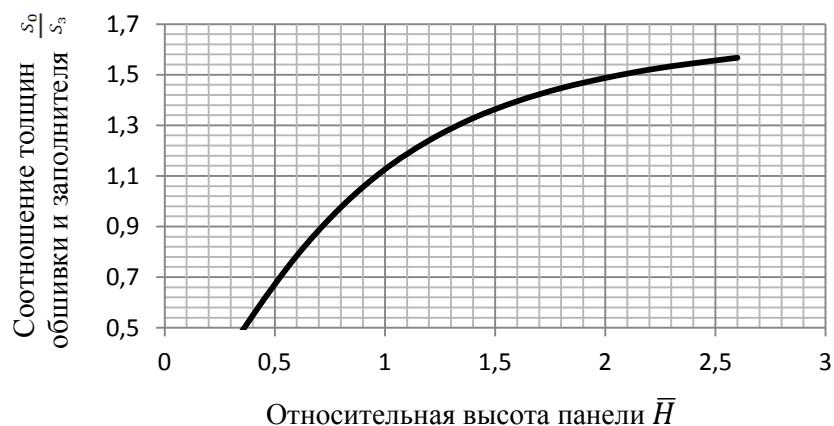


Рисунок 9 – Диапазон выбора соотношения толщин в зависимости от относительной высоты панели

Для многослойной панели с относительной высотой $\bar{H} = 1,8$ рекомендуемое соотношение толщин составляет $S_0/S_{3_0} > 1,45$, принято значение $S_0/S_{3_0} = 2$, тогда рекомендуемая толщина заполнителя $S_{3_0} = 1$ мм.

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

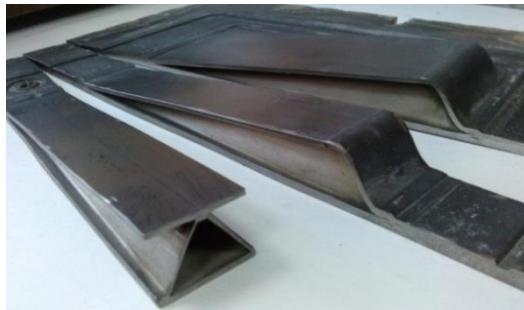


Рисунок 10 – Клиновидная панель с продольным гофром



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 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 рисунках 12 и 13.

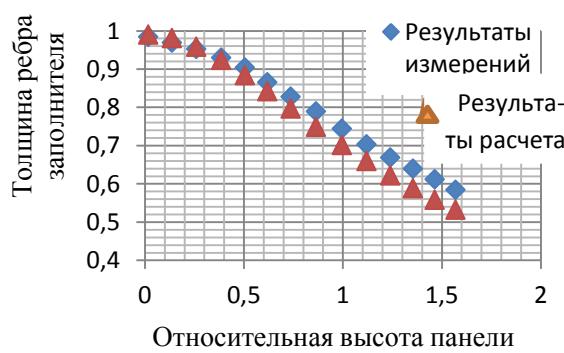


Рисунок 12 – Сравнение результатов измерения и расчёта толщины заполнителя панели с продольным гофром

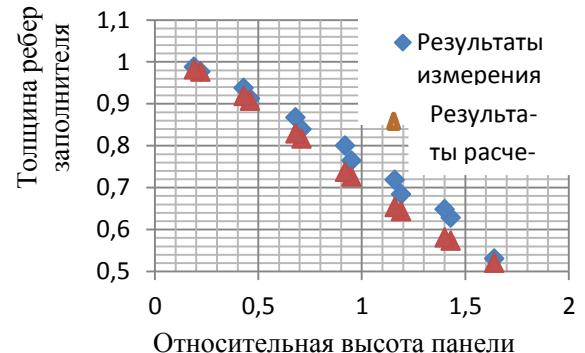


Рисунок 13 – Сравнение результатов измерения и расчёта толщины заполнителя панели с поперечным гофром

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 рисунках 14 и 15.

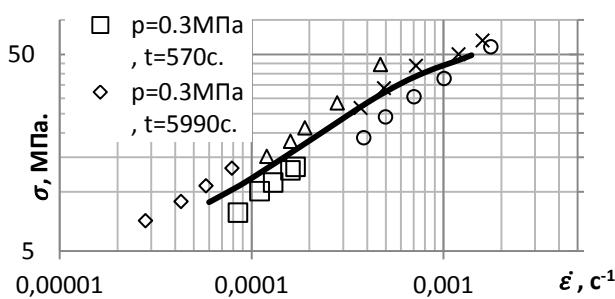


Рисунок 14 – График зависимости
 $\sigma_k = f(\dot{\varepsilon}_k)$

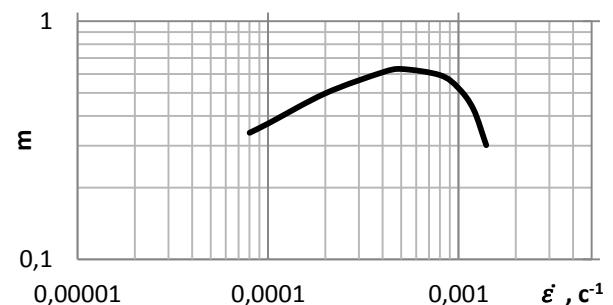


Рисунок 15 – График зависимости
 $m = f(\dot{\varepsilon}_k)$

Свойства сверхпластичности титанового сплава ОТ4-1, определённые из данных по испытаниям, и других титановых сплавов, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Свойства сверхпластичности титановых сплавов

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_s, \text{МПа}$	$\dot{\varepsilon} \cdot 10^{-3}, \text{с}^{-1}$	m
ОТ4-1	890	28	0,4	0,64
ВТ6	900	21	0,33	0,37
ВТ20	950	40	1,6	0,42

Свойства сверхпластичности сплавов использованы для определения технологических параметров формовки трехслойных панелей.

Разработана методика определения переменного шага ребер заполнителя, обеспечивающего постоянство степени деформации каждого ребра панели. По графикам на рисунках 16 и 17, в зависимости от заданной доли k от допустимой деформационной способности материала при растяжении δ_{max} , принятой исходя из ограничения вели-

чины утонения, определяется отношение первоначальной длины ребра к конечной и относительная высота панели.

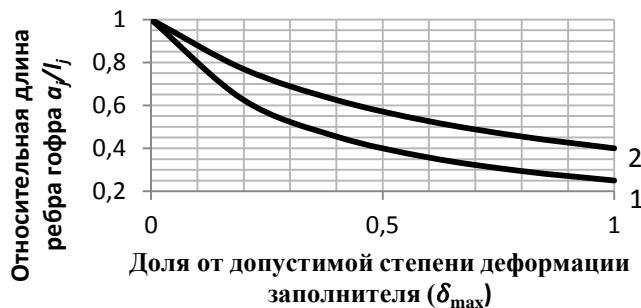


Рисунок 16 – Зависимость относительной длины ребра от степени деформации



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 рёбер равной толщины, представленная на рисунке 18.



Рисунок 18 - Разрез трёхслойной клиновидной панели с переменным шагом ребер из сплава OT4-1

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 сво-

бодной 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 пневмотормической 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, 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, 2013, №9, с.50-54.
3. Колесников А.В., Шмаков А.К. Пневмотермическая формовка трёхслойных клиновидных панелей с подпором обшивок// Вестник 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, 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, 2014, №1, с.32-38.
6. Колесников А.В. Предотвращение возникновения дефектов в процессе пневмотермической формовки трёхслойных панелей из титановых сплавов// Вестник МАИ, 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// Материалы Всероссийского научно-практического семинара «Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолётов», 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: сборник докладов / Под общ. ред. А.Ю. Дияка. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012, с.100-110.
9. Колесников А.В. Анализ возможности пневмотермической формовки многослойных конструкций методом виртуального моделирования (тезисы доклада)// Решетневские чтения: Материалы XVI Международной научной конференции, 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.