

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Иркутский государственный технический университет»**

На правах рукописи



КОЛЕСНИКОВ Алексей Владимирович

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

Специальность 05.07.02 –

Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Кандидат технических наук,

доцент А.К. Шмаков

Комсомольск-на-Амуре - 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	10
1.1 Общая характеристика процесса пневмотермической формовки и диффузионной сварки многослойных панелей в режиме сверхпластичности	10
1.2 Применение многослойных конструкций.....	12
1.3 Технологические схемы процесса пневмотермической формовки и диффузионной сварки.....	19
1.4 Обзор теоретических исследований ПТФ/ДС.....	25
1.5 Оборудование для технологии ПТФ и ПТФ/ДС. Обзор экспериментальных исследований.....	37
1.6 Выводы. Задачи исследования.....	44
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.....	46
2.1 Клиновидные трёхслойные панели.....	46
2.1.1 Клиновидная трёхслойная панель с поперечным гофровым набором постоянного шага ребер.....	47
2.1.2 Клиновидная трёхслойная панель с продольным гофровым набором постоянного шага ребер.....	49
2.2 Определение технологических параметров пневмотермической формовки клиновидных трёхслойных панелей.....	50
2.2.1 Исходные допущения и уравнения.....	50
2.2.2 Исследование стадии формовки заполнителя.....	52
2.2.3 Учет боковой зоны при определении параметров нагружения.....	62
2.3 Предотвращение возникновения дефектов в процессе формовки многослойных панелей.....	66
2.3.1 Прогиб обшивки в процессе формообразования многослойных панелей.....	66
2.3.2 Определение критических значений соотношения толщины обшивки и заполнителя.....	68
2.3.3 Величина критической высоты прогиба.....	73
2.4 Технологические параметры процесса ПТФ/ДС клиновидных панелей с подпором обшивок.....	75

2.4.1	Определение технологических параметров формовки с подпором обшивки плитой с механическим приводом	76
2.4.2	Определение технологических параметров формовки панелей с подпором обшивки плитой, управляемой противодавлением	80
2.5	Алгоритм расчета технологических параметров процесса пневмотермической формовки клиновидной многослойной панели	83
2.6	Выводы	86
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.....	88
3.1	Виртуальные исследования	89
3.1.1	Моделирование формовки рифтов	89
3.1.2	Оценка результатов моделирования.....	92
3.1.3	Определение соотношения толщин для обеспечения формовки без образования утяжин.....	100
3.1.4	Оценка рекомендуемого диапазона значений соотношения толщин	101
3.2	Натурные эксперименты.....	109
3.2.1	Оборудование для проведения экспериментов.....	109
3.2.2	Оснащение для проведения экспериментов	113
3.2.3	Процесс ПТФ/ДС многослойных титановых панелей	116
3.2.4	Проверка разработанных математических моделей. Апробация методики расчета «давление – время».....	117
3.2.5	Определение параметров клиновидных трёхслойных панелей	118
3.2.6	Определение технологических параметров формовки клиновидных трёхслойных панелей.....	119
3.2.7	Распределение толщины заполнителя по профилю и сечению панелей.....	122
3.3	Выводы	135
4	ОПЫТНЫЕ РАБОТЫ.....	137
4.1	Определение свойств сверхпластичности титановых сплавов.....	137
4.2	Конструктивно-технологические рекомендации по выбору параметров клиновидных панелей	144

4.2.1	Рекомендации по выбору конструктивно-геометрических параметров поперечного гофрового набора клиновидной многослойной панели.....	144
4.2.2	Рекомендации по выбору конструктивно-геометрических параметров продольного гофрового набора клиновидной многослойной панели.....	153
4.3	Технологические рекомендации по выбору способа ПТФ	155
4.4	Требования к разработке оборудования.....	158
4.5	Рекомендации по разработке технологического оснащения	160
4.6	Опытное изготовление трёхслойных клиновидных панелей.....	164
4.7	Исследование качества материала панелей после процесса ПТФ/ДС..	171
4.8	Выводы	177
	РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	179
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	181
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	182
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	193
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	214
	ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	215

ВВЕДЕНИЕ

Развитие и внедрение в производство высокоэффективных технологий является основной задачей научно-технического прогресса в машиностроительных отраслях промышленности. Одной из таких технологий, применяемых в производстве тонкостенных многослойных конструкций из трудно-деформируемых сплавов является совмещенный процесс диффузионной сварки и пневмотермической формовки (ПТФ/ДС) в режиме сверхпластичности (СП). По сравнению с традиционными методами получения таких конструкций, ПТФ/ДС обладает рядом преимуществ, к числу которых относят высокую точность формуемых изделий, резкое снижение количества деталей в конструкции, высокую деформационную способность сплавов, низкие значения силовых параметров процесса и широкие возможности беспрессовой штамповки вследствие резкого снижения сопротивления сплавов деформированию.

Актуальность темы. Применение ПТФ/ДС позволяет сократить затраты ручного труда и снизить себестоимость получаемых многослойных конструкций. Существенное расширение технологических возможностей процессов ПТФ/ДС и проектных решений при конструировании изделий позволит получать сложные по конфигурации многослойные конструкции, которые невозможно изготовить другими способами. ПТФ/ДС открывает новые возможности в ракетостроении, авиастроении, машиностроении и железнодорожном транспорте при производстве многослойных конструкций различной формы в виде силовых панелей, пожарных перегородок, полых лопаток и т.д.

Однако освоение и практическое использование процессов ПТФ/ДС затрудняется из-за недостатка теоретических и экспериментальных данных о влиянии конструктивно-геометрических характеристик конструкций на технологические параметры процесса формовки, а также отсутствие

технологической оценки типовых многослойных конструкций переменной высоты (клиновидных многослойных панелей), получаемых ПТФ/ДС.

В связи с этим настоящая работа посвящена исследованию процессов пневмотермической формовки клиновидных трёхслойных панелей из титановых сплавов на основе анализа технологических параметров формовки с соблюдением условий СП.

Объектом исследования является технологический процесс пневмотермической формовки (ПТФ) трёхслойных клиновидных панелей из титановых сплавов.

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

Целью работы является исследование и разработка технологического процесса ПТФ/ДС трёхслойных клиновидных панелей в режиме сверхпластичности.

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 (ПК) «MSC Marc»;

- натурные эксперименты проводились в прессе сверхпластической формовки и диффузионной сварки «FSP 60T» с универсальной оснасткой, имеющей различные вставки;

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

Научная новизна работы заключается в следующем:

- установлены основные закономерности процесса пневмотермической формовки клиновидных трёхслойных конструкций в режиме сверхпластичности на основе исследования механики и особенностей процесса;
- разработан метод определения конструктивно-геометрических параметров трёхслойных панелей, позволяющий прогнозировать условия бездефектной формовки;
- разработана методика расчета технологических параметров пневмотермической формовки клиновидных трехслойных панелей с учётом способа изготовления.

Практическая ценность работы:

- разработана программа для расчёта технологических параметров пневмотермической формовки трёхслойных клиновидных панелей из титановых сплавов на стадии свободной формовки заполнителя;
- разработан алгоритм выбора способа изготовления трёхслойных клиновидных панелей в зависимости от параметров гофрированного заполнителя;
- определены свойства сверхпластичности титановых сплавов;
- 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 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: научно-технической конференции «Авиа-машиностроение и транспорт Сибири» от кафедры «СМиЭАТ» ИрГТУ в 2011 г., 2012 г., 2013 г. и 2014 г.; конференции «Высокоэффективные технологии проектирования конструкций, технологической подготовки и изготовления самолёта МС-21», организованной Иркутским авиационным заводом (ИАЗ), филиалом ОАО «Корпорация «Иркут» в 2012 г.; XV Российской конференции пользователей компьютерных систем инженерного анализа «MSC Software 2012»; международном форуме «Инженеры будущего» на круглом столе «Разработка и внедрение комплекса высокоэффективных технологий производства ЛА в рамках сотрудничества ИАЗ и НИ ИрГТУ в соответствии с ПП №218»; XVI международной научной конференции «Решетневские чтения – 2012», посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева; региональной выставке «Энергосбережение. Техмашэкспо. Сварка 2013» в рамках круглого стола «Инновационные технологии в проектировании и производстве изделий машиностроения»; третьей научно-практической конференции «Молодёжь. Проекты. Идеи» в секции «Подготовка производства», организованной ИАЗ в 2013 г.; третьей научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Исследования и перспективные разработки в машиностроении» в г. Комсомольск-на-Амуре в 2014 г., где был удостоен дипломом II степени за высокий научный уровень доклада.

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, списка сокращений и условных обозначений, а также трёх приложений. Полный объём работы составляет 215 страниц, в том числе основной текст 180 страниц, 114 рисунков и 13 таблиц, списка литературы (114 наименований, 10 страниц).

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Общая характеристика процесса пневмотермической формовки и диффузионной сварки многослойных панелей в режиме сверхпластичности

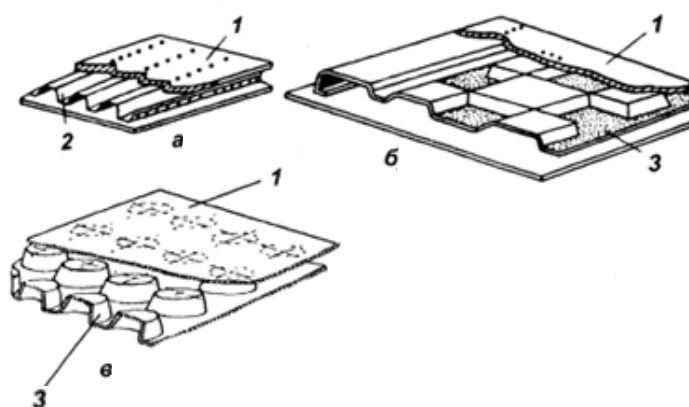
С открытием эффекта сверхпластичности советскими учеными Бочваром А.А. и Свидерской З.А. [7] в 1945 г., а в последующем технологии ПТФ, предложенной учёными из США Бэкофеном, Тернером и Эвери [88] в 1964 г., зарекомендовавшей себя как перспективное направление исследований [3, 4, 6, 8, 84], возникли широкие возможности по изготовлению деталей и конструкций с принципиальными преимуществами, такими как сложность формы изделия, расширение технологических ограничений на формовку и т.д. [42, 65, 91].

Широкие исследования сверхпластичности развернулись с середины 60-х годов прошлого века. Эти исследования были направлены в основном на поиск сверхпластичных сплавов, определение режимов и условий проявления сверхпластичности, исследование характеристик сплавов, влияние на них структуры и других факторов.

Теоретическому и практическому исследованию СП посвящено множество работ отечественных и зарубежных учёных. Большой вклад в исследование сверхпластичности внесли труды Преснякова А.А. [49], Кайбышева О.А. [2, 17-20], Шоршорова М.Х. [52], Тихонова А.С. [3, 64], Смирнова О.М. [55, 57, 58, 74], Пашкевича А.Г. [38-45], Васина Р.А. [10] и др., а также зарубежных ученых, из которых следует отметить В. Бэкофена [9], М. Грабского [12], Р. Джонсона [91], Д. Ли [111], Д. Эвери [84, 88], Джифкинса Р.С. [14].

С развитием технологии сверхпластического формования К.Х. Гамильтоном и Л.А. Аскани был предложен и запатентован совмещённый метод пневмотермической формовки совмещённой с диффузионной сваркой (ПТФ/ДС) [102, 103, 104], работы в этом направлении также велись и в нашей стране.

Благодаря совмещенному методу ПТФ/ДС стало возможным создание эффективных многослойных конструкций из труднодеформируемых титановых сплавов, которые невозможно изготовить другими известными способами. На рисунке 1.1 показаны примеры трёхслойных панелей с различными типами заполнителей, которые могут быть изготовлены методом ПТФ/ДС [37, 63, 87, 105].



а - с гофрированным заполнителем; б - с заполнителем вафельного типа; в - с ячеистым заполнителем; 1 - обшивка; 2 - гофрированный заполнитель; 3 - ячеистый заполнитель

Рисунок 1.1 - Трёхслойные панели

Достоинством гофрированных и ячеистых панелей, представленных на рисунке 1.1, является:

- повышенная прочность и надёжность соединения листов обшивки и заполнителя;
- высокие виброакустические характеристики в широком спектре частот;
- повышенные теплоизоляционные и звукоизоляционные характеристики;
- широкие возможности поиска рациональных конструктивных решений;
- технологичность, упрощённые стыковки панелей друг с другом и с элементами каркаса.

Соединение несущих слоёв с наполнителем повышает критическое напряжение местной потери устойчивости, что позволяет получить лёгкую и прочную конструкцию.

Для таких конструкций наиболее приемлемо применение процесса пневмотермической формовки совмещённой с диффузионной сваркой (ПТФ/ДС). Титановые сплавы являются эффективными материалами для реализации процесса ПТФ/ДС. Это связано с тем, что они обладают наилучшими возможностями формоизменения в режиме СП, наиболее простой технологией диффузионной сварки (ДС) и максимальными прочностными характеристиками сварного соединения (до 96% от прочности исходного материала). А также, титановые сплавы имеют высокую коррозионную стойкость, низкий коэффициент линейного термического расширения, что даёт возможность применения их совместно с композиционными материалами. Кроме того, титановые сплавы обладают высокой удельной прочностью.

1.2 Применение многослойных конструкций

Работы по практическому освоению процесса изготовления многослойных конструкций методом ПТФ/ДС широко развернуты в 70–80-е годы рядом зарубежных фирм (США, Великобритании, Франции, ФРГ, Японии, Канады и др.). Особый интерес к процессу ПТФ проявляют авиакосмические компании, что обусловлено специфическими требованиями к конструктивным элементам ЛА и их применением [85, 108, 113, 114].

Первым самолетом, на котором в значительных количествах использованы титановые элементы конструкций, изготовленные формовкой в состоянии СП, является истребитель F-15E [93]. Компанией McDonnell-Douglas aircraft освоено производство более 100 наименований деталей – элементы нервюр, шпангоутов, лонжеронов, сложные обшивки, фитинги, створки, обтекатели и др. (рисунок 1.2).

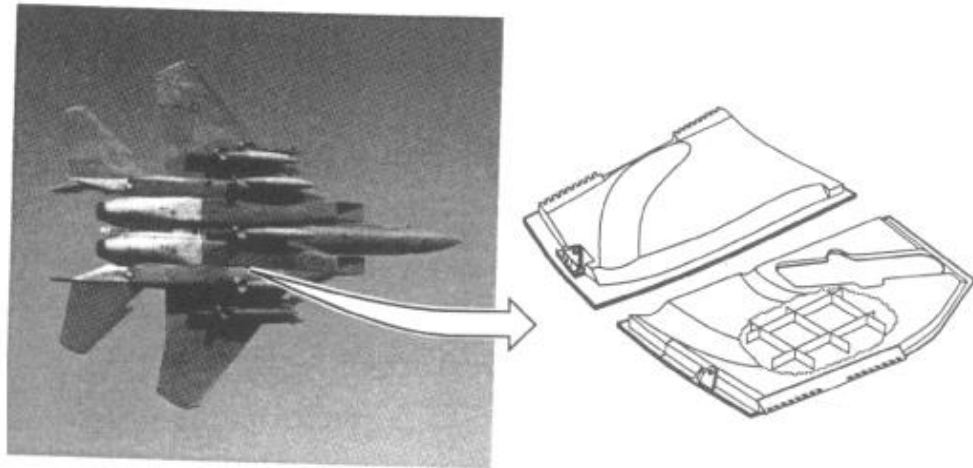


Рисунок 1.2 - Конструкция створки шасси самолета F-15E, изготовленная по технологии ПТФ/ДС

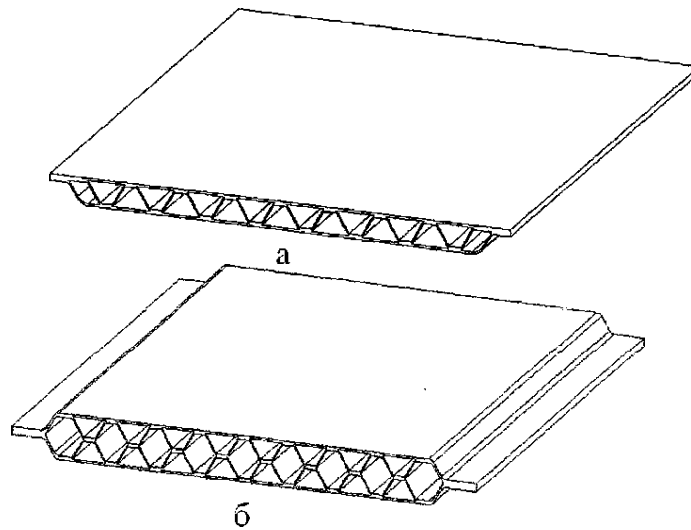
Компания Rockwell освоила производство 68 наименований деталей для бомбардировщика В-1 (рисунок 1.3). В их число входят стенки лонжерона, панели задней части гондолы двигателя, крышки люков, сопло форсунки фонаря кабины [83, 93, 97, 106, 112]. Экономия средств составила до 30–50%, снижение массы деталей и узлов на 20–30%.



Рисунок 1.3 - Конструкции самолёта «В-1В», изготовленные методом ПТФ/ДС

Особую значимость компания придает освоению технологии ПТФ/ДС для изготовления трехслойных панелей. На рисунке 1.4 представлены схемы гофрированных панелей, полученных с помощью комплексного процесса ДС и ПТФ.

Подобные панели применяются на изделиях фирмы Туполева и др. в качестве противопожарных перегородок двигательных отсеков. Подобную схему имеют монолитные гондолы двигателей самолётов компании Rockwell Int.



а - с однорядным гофрированным заполнителем; б - с двухрядным гофрированным заполнителем

Рисунок 1.4 - Гофрированные панели

Проведенные компанией Rockwell испытания образцов гофрированных панелей из сплава «Ti-6Al-4V» показали, что механические свойства соединения не уступают свойствам основного материала. Такая конструкция имеет высокую жесткость в продольном и поперечном направлении.

Также такие конструкции применяются для изготовления нагруженных и огнеупорных перегородок, абсолютно жестких выхлопных труб и лопаток вентилятора газотурбинных двигателей.

Компанией Northrop в качестве примера эффективности перехода к прогрессивной технологии для сверхзвукового учебного реактивного самолёта «Т-38» был перепроектирован стабилизатор под технологию ПТФ/ДС [82]. Стабилизатор представляет четырёхслойную сэндвичевую конструкцию из титанового сплава «Ti-6Al-4V» с силовыми элементами для крепления стабилизатора, представленного на рисунке 1.5.

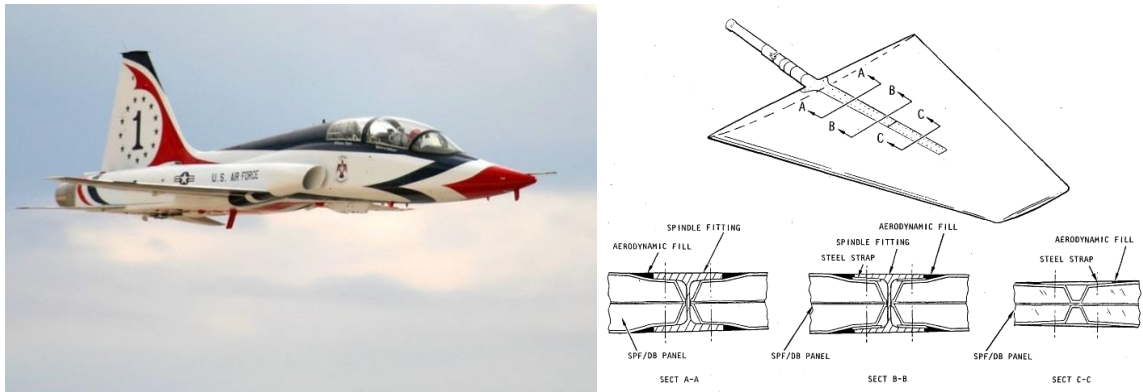


Рисунок 1.5 - Стабилизатор самолёта «Т-38»

Макет четырёхслойной панели стабилизатора самолёта «Т-38», представлен на рисунке 1.6.

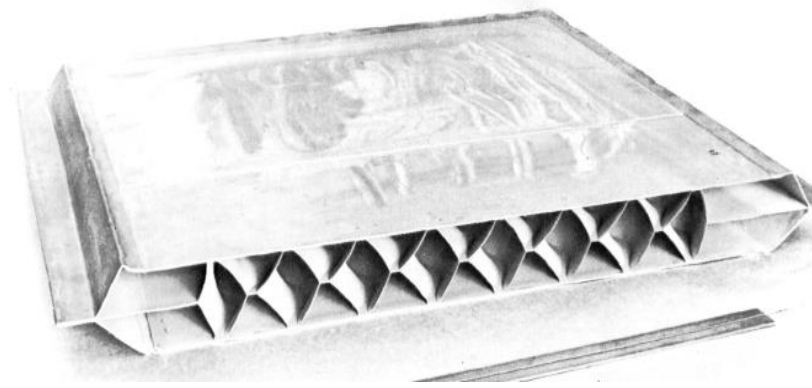
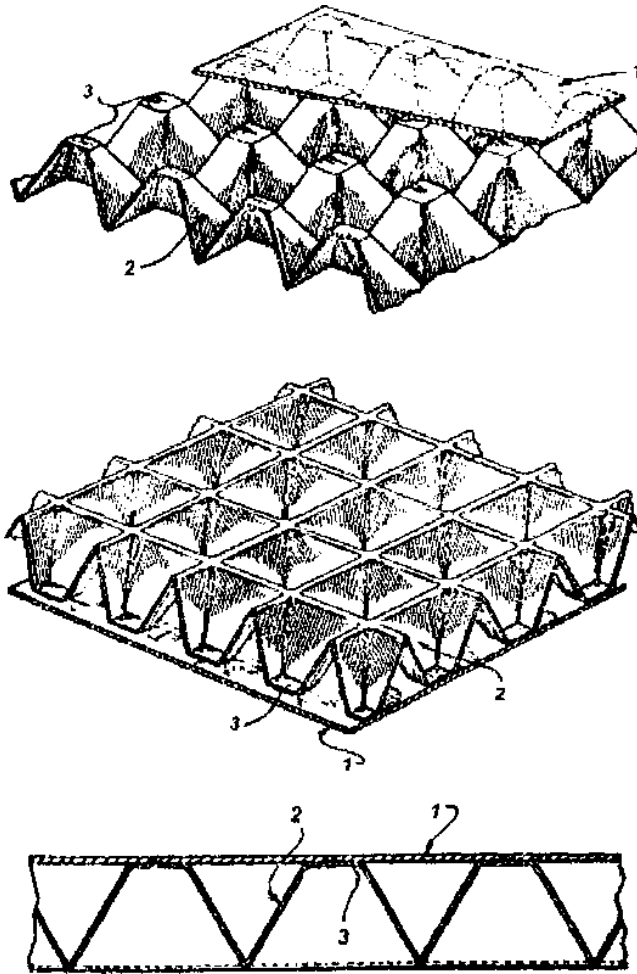


Рисунок 1.6 - Четырёхслойная панель стабилизатора

На рисунке 1.7 представлена ячеистая панель, разработанная компанией Lockheed Georgia [37]. В отличие от обычного выполнения слоистых конструкций панель содержит два конструктивных элемента - несущий лист обшивки (1) и лист жёсткости с местными выштамповками пирамидальной формы (2). Листы могут быть соединены между собой точечной или диффузионной сваркой, клёпкой либо пайкой по торцевым площадкам выштамповок (3).

Для повышения прочности и жёсткости участки площадок или перемычек могут иметь утолщения либо усиливаться дополнительными элементами в виде отбортованных отверстий (рисунок 1.8) [37].



1 - лист обшивки; 2 - лист жёсткости; 3 - торцевые площадки
выштамповок

Рисунок 1.7 - Ячеистая панель фирмы «Lockheed Georgia»

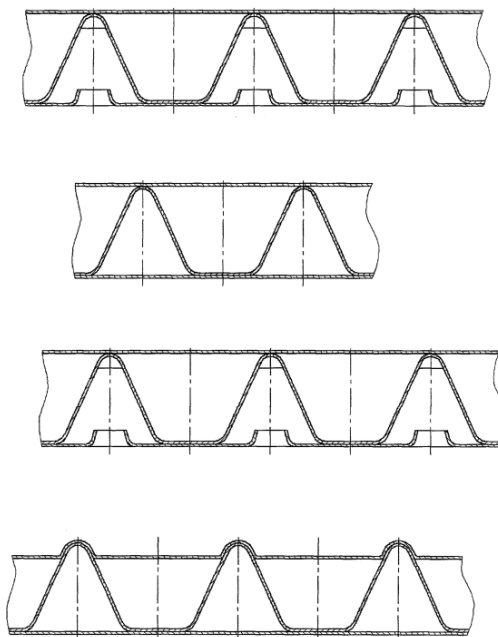
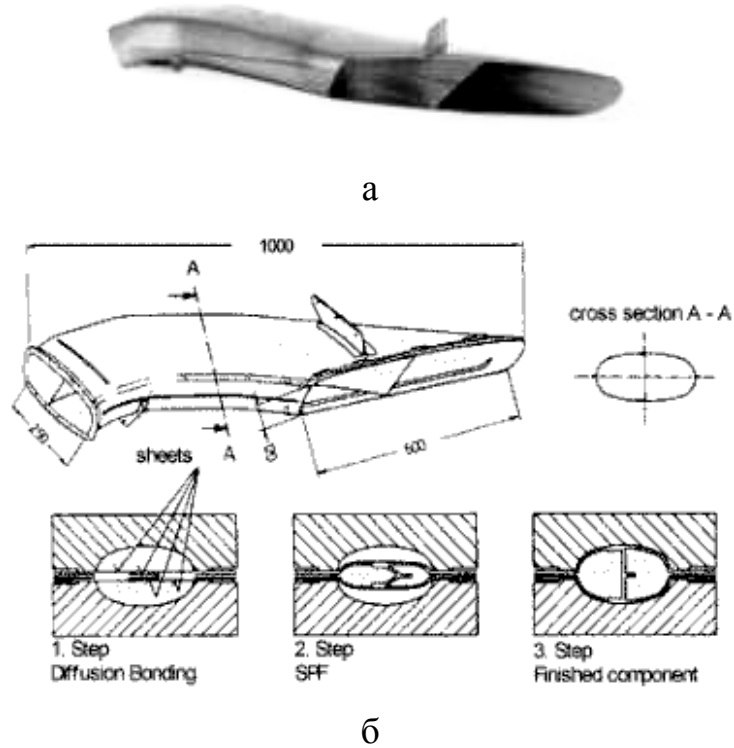


Рисунок 1.8 - Ячеистые панели с местным усилением жёсткости листа

Компанией Form Tech GmbH технология ПТФ/ДС используется для изготовления воздушных коллекторов (рисунок 1.9) [99].



а – общий вид детали; б – схема изготовления

Рисунок 1.9 – Коллектор

Компанией AIRBUS технология ПТФ/ДС используется для изготовления крышек люков самолёта «A320» [81] (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Титановые крышки люков

Компания British Aerospace имеет значительные достижения в производстве методом ПТФ/ДС конструкций ответственного назначения из алюминиевых и титановых сплавов, а также сплава на основе интерметаллида Ti_3Al для пассажирских авиалайнеров и военных самолетов [90, 95].

Компания Rolls-Royce освоила технологию изготовления полых лопаток турбин авиационных двигателей методом ПТФ/ДС [100].

В последние годы интерес к технологии ПТФ/ДС возрастает не только за рубежом, но и в России [19, 20, 23, 29]. Активные работы в этом направлении начинают возрождаться в различных производственных и научных организациях.

Отечественное предприятие НПО «Техномаш» (г. Москва) разработало ряд конструкций авиакосмической техники, изготавливаемых методом ПТФ/ДС, таких как корпусные и несущие элементы летательных аппаратов, крыльев, радиаторов системы терморегулирования приборных отсеков. Конструкции изготавливаются из алюминиевых и титановых сплавов, таких как: АМг6, 1570, 1970, 1201, ВТ14, ВТ23. Панели имеют габаритные размеры до 2000 мм, высота панелей до 20...25 мм, исходная толщина листов от 0,6 до 1,5 мм. [67, 68, 69, 70, 75, 76, 77, 78].

Анализ накопленного опыта показывает, что технологии ПТФ и ПТФ/ДС по сравнению с традиционными способами изготовления многослойных конструкций имеют ряд достоинств [45, 53, 57, 74]:

- резкое снижение количества деталей, возможность исключения деталей крепежа (заклёпок, болтов, и т.д.);
- снижение трудоёмкости сборочных работ;
- возможность изготовления сложных по конфигурации изделий, обусловленная высокой деформационной способностью сплавов в состоянии СП;
- низкие значения силовых параметров процесса (усилий, давлений) и широкие возможности беспрессовой штамповки вследствие резкого снижения сопротивления сплавов деформированию;

– высокая точность формуемых изделий вследствие отсутствия пружинения, что создает благоприятные предпосылки беззаводочной штамповки.

К основным недостаткам процессов ПТФ и ПТФ/ДС относят:

– продолжительность цикла формовки, обусловленная малыми скоростями деформации;

– ярко выраженная разнотолщинность формуемых деталей [15, 39, 51].

Указанные недостатки не являются серьезным препятствием для широкого применения ПТФ/ДС. Длительность цикла формовки не означает высокой трудоемкости и длительности процесса изготовления изделия в целом. Сокращение количества деталей и исключение сборочных операций позволяет сократить цикл производства и снизить трудоемкость их изготовления, в отличие от традиционной технологии. В современном производстве разработан и успешно опробован ряд специальных способов и технических приемов формовки, обеспечивающих не только уменьшение разнотолщинности, но и получение изделий с заданным профилем распределения толщины [32, 44, 101].

За счёт внедрения технологии ПТФ/ДС удаётся снизить массу конструкции на 15-30% и уменьшить производственные затраты на 30-40% [74, 110].

Таким образом, технология ПТФ/ДС сохраняет свою актуальность и перспективность и требует более глубокого изучения и освоения.

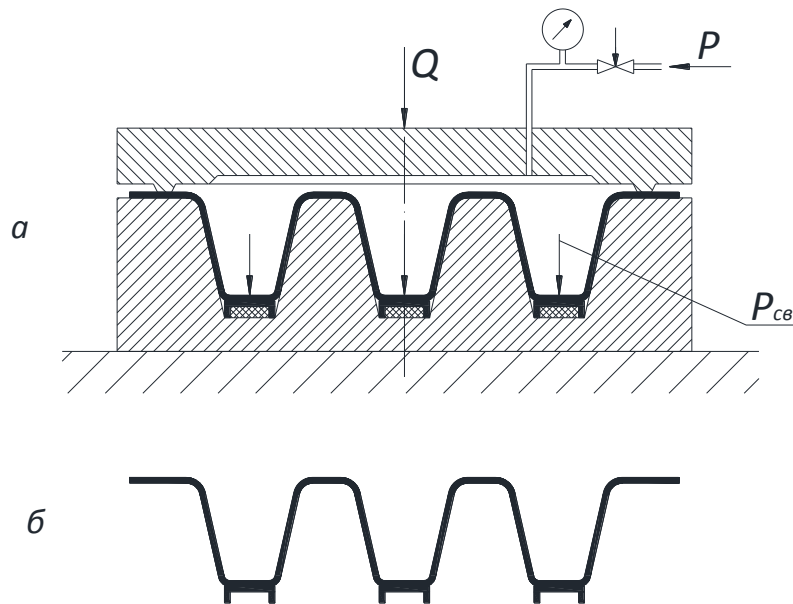
1.3 Технологические схемы процесса пневмотермической формовки и диффузионной сварки

В совмещённом процессе ПТФ/ДС отработаны и успешно опробованы четыре схемы реализации процесса, для изготовления листовых конструкций [53]:

- 1) листовых конструкций с подкрепляющими элементами;
- 2) двухслойных конструкций;

- 3) трёхслойных конструкций;
- 4) четырёхслойных конструкций.

Схема 1. Процесс, представленный на рисунке 1.11 а, предполагает предварительную укладку подготовленных элементов в оснастку (пластин, стержней, фитингов и пр.). Формовка листа производится подачей газа в полость оснастки по определённой зависимости. На завершающем этапе формовки давление газа повышают до необходимого для диффузионной сварки, в результате чего происходит сварка в местах сопряжения. Способ может быть с успехом использован для компенсации утонения листа в наиболее деформированных участках и для соединения листа с фитингами, кронштейнами и другими конструктивными элементами (рисунок 1.11б).

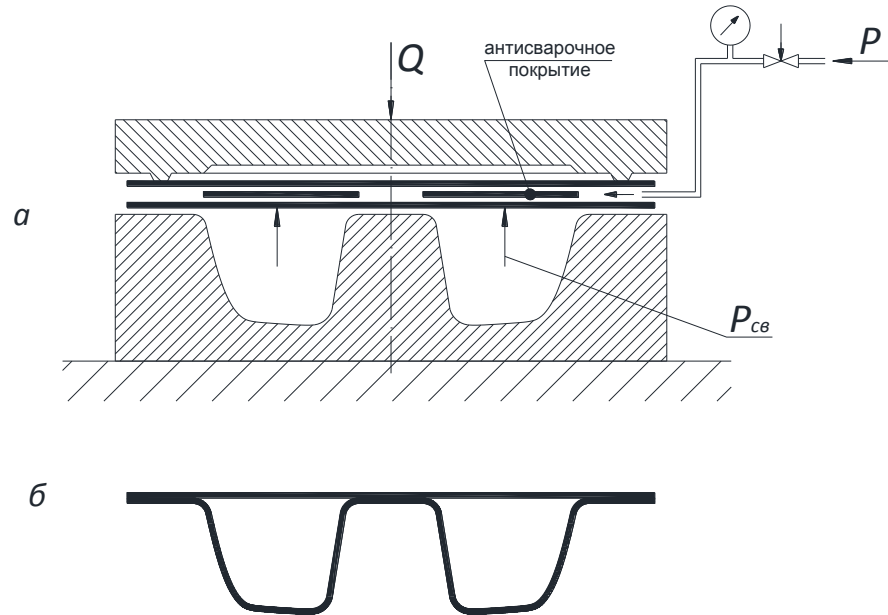


а - схема процесса; б - получаемая деталь

Рисунок 1.11 - Первая схема процесса ПТФ/ДС

Схема 2. Процесс (рисунок 1.12 а) заключается в том, что на лист локально (в местах деформации) наносится антисварочное покрытие. После сборки двух листов создаётся давление сварки ($p_{св}$), в результате чего происходит сварка листов в местах отсутствия покрытия. Далее подаётся давление аргона между листами и формируется один из листов по профилю

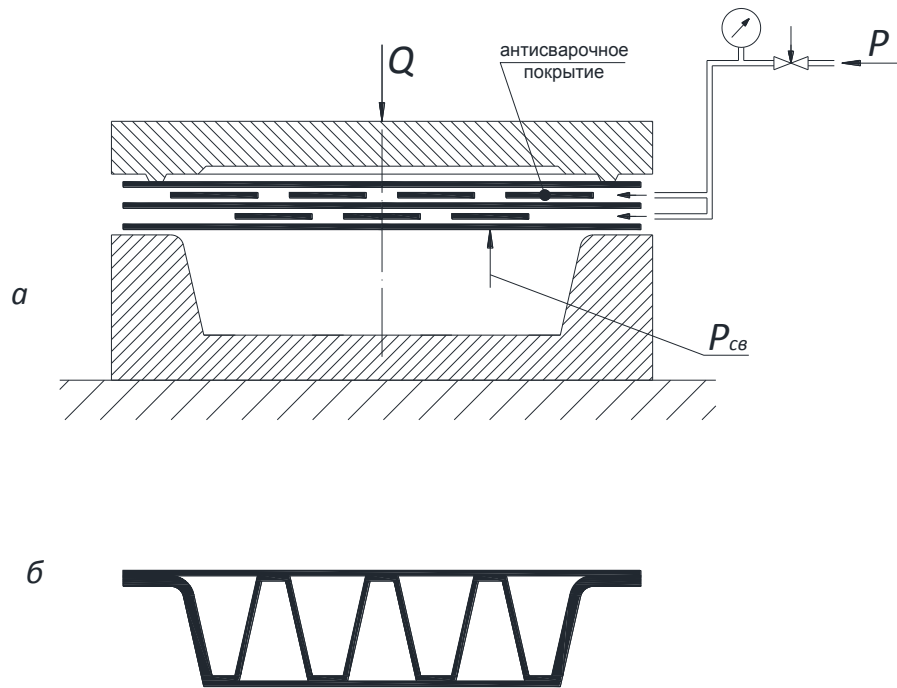
инструмента (рисунок 1.12 б). Способ используют для изготовления интегральных жестких конструкций – панелей в виде листов, подкрепленных элементами жесткости (панель со шпангоутами и стрингерами или панель с элементами продольного и поперечного набора).



а - схема процесса; б - получаемая деталь

Рисунок 1.12 - Вторая схема процесса ПТФ/ДС

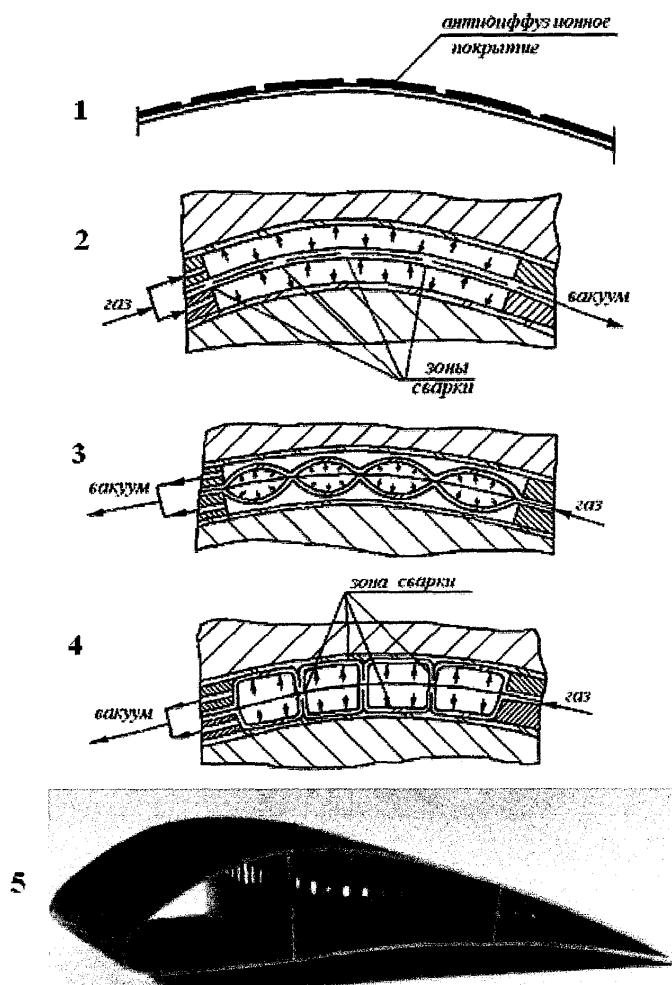
Схема 3. По процессу, представленному на рисунке 1.13 а, на средний лист наносится антисварочное покрытие с двух сторон в шахматном порядке. Собирается пакет из трех листов. После нагрева до определённой температуры подаётся давление сварки. Средний лист сваривается по участкам, свободным от антисварочного покрытия, с листами обшивки. При подаче газа между листами формируется трехслойная панель (рисунок 1.13 б). Форма заполнителя определяется рисунком наносимого антисварочного покрытия. При реализации данной схемы процесса возможно получение панелей и оболочек с однонаправленным складчатым заполнителем.



а - схема процесса; б - получаемая панель

Рисунок 1.13 - Третья схема процесса ПТФ/ДС

Схема 4. По процессу, представленному на рисунке 1.14, на средний лист локально наносится антисварочное покрытие. Собирается пакет из четырёх листов и устанавливается в оснастку. По достижению необходимой температуры нагрева в полость оснастки подаётся давление сварки, и производится сварка средних листов между собой в местах без антисварочного покрытия. После этого подают давление между средними листами и производят формовку листов. При этом формуемые участки средних листов впоследствии свариваются между собой и с листами обшивки, образуя вафельный наполнитель или элементы силового набора.



1 - нанесение антисварочного покрытия; 2 - сварка листов между собой; 3 - формовка заполнителя; 4 - калибровка заполнителя, сварка с обшивками; 5 - пример конструкции, полученной по данной схеме (материал: сплав ВТ6; габариты: длина - 330 мм, ширина - 100 мм)

Рисунок 1.14 - Четвертая схема процесса ПТФ/ДС

Ребра заполнителя могут иметь различную форму, жёсткость таких конструкций может значительно различаться в разных направлениях. Размер ячеек подбирается таким, чтобы обеспечить равномерное подкрепление поверхностных листов. Такие конструкции могут быть применены в элементах крыла или панелях фюзеляжа гиперзвуковых ракет, работающих в условиях повышенных температур.

В общем случае для четырех представленных схем можно выделить принципиальную схему технологического процесса с применением ПТФ/ДС, которая включает следующие основные этапы:

- подготовку листа и подкрепляющих элементов, либо листов обшивок и заполнителя;
- нанесение рисунка антисварочного покрытия на лист заполнителя многослойной конструкции с двух сторон;
- подготовку поверхностей под сварку;
- сборку пакета из листов (2 и более);
- нанесение антисварочного покрытия на внешние поверхности пакета, либо листа для недопущения сварки с оснасткой;
- установку пакета в оснастку;
- нагрев до температуры ПТФ/ДС;
- пневмотермическую формовку листа (для однолистовых конструкций) в соответствии с расчётной кривой нагружения;
- диффузионную сварку листа с подкрепляющими элементами, либо листов заполнителя с листами обшивки в местах без антисварочного покрытия;
- пневмотермическую формовку многослойной конструкции подачей давления формовки между листами, в результате чего осуществляется формообразование заполнителя и оформление панели в соответствии с формой оснастки.

Форма заполнителя определяется рисунком нанесения антисварочного покрытия, в зависимости от которого могут быть получены заполнители различного типа:

- гофровые;
- вафельного типа;
- ячеек различной конфигурации;
- комбинированные.

Изделия не обязательно должны иметь плоскую форму. Для изменения высоты конструкции в оснастку могут быть уложены дополнительные элементы [33]. Для придания кривизны могут быть использованы специальные способы предварительного изгиба или закрутки.

1.4 Обзор теоретических исследований ПТФ/ДС

В работах, посвящённых теоретическому исследованию пневмотермической формовки [25, 34, 36, 38, 46, 98, 101, 107] показано, что важнейшим параметром формовки является закон изменения давления формующего газа по времени. При определении закона изменения давления необходимо соблюдать условия сверхпластической деформации материала [61], из которого изготавливается конструкция. При решении задачи, в качестве основных, используются известные допущения теории листовой штамповки [16, 21, 22, 26, 47, 59, 62]. Расчёт кривых нагружения $p(\tau)$ ведётся из условия обеспечения постоянства скорости деформации заполнителя в режиме СП [30, 31, 40, 41, 43].

В работе Пашкевича А.Г., Орехова А.В. и Смирнова В.А. [43] определение закона изменения давления во времени $p(\tau)$ осуществляется для плоско-параллельной панели на основе анализа процесса формообразования заполнителя, боковых и угловых участков панели. На рисунке 1.15 приведена расчётная схема процесса. Согласно этой схеме образование ребер заполнителя происходит под действием силы P_{ni} за счёт растяжения участков «Б» листа заполнителя, не сваренного ни с одной из обшивок.

Авторами определена сила, возникающая при разводе обшивок давлением формующего газа p_i :

$$P_{ni} = \frac{p_i M}{n}, \quad (1.1)$$

где p_i – давление формующего газа;

$i = 1, 2, 3, \dots, k$ – этапы формовки;

M – площадь зоны формовки нижней обшивки;

n – число ребер гофров.

Площадь зоны формовки нижней обшивки определяется зависимостью:

$$M = Bl,$$

где B – ширина зоны формовки;

l – длина гофра.

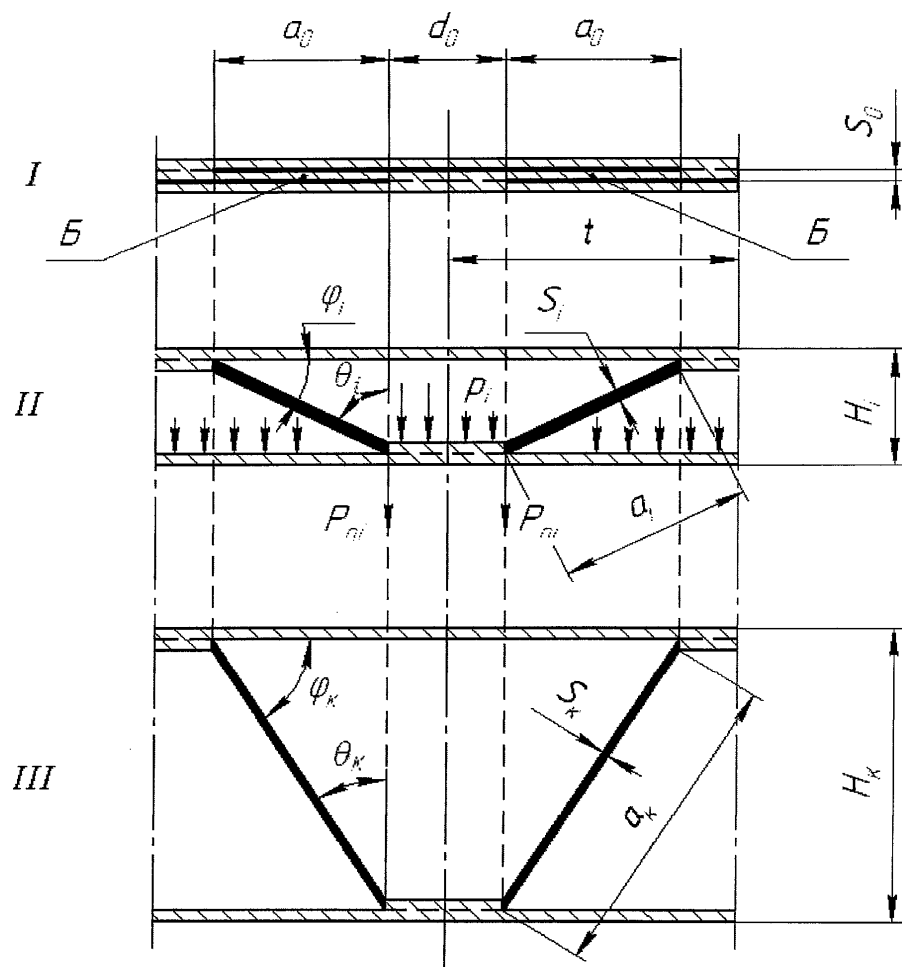


Рисунок 1.15 - Расчётная схема образования ребер заполнителя

Для расчёта в работе [43] принято, что нижний лист обшивки равномерно отходит от верхнего листа по всей поверхности. Прогиб участков нижнего листа между сварными участками не учитывается. Считается, что материал зон

диффузионной сварки не деформируется в процессе формовки заполнителя. Толщина заготовки по очагу деформации принимается постоянной. Для того, чтобы деформация листа заполнителя осуществлялась в условиях сверхпластичности, необходимо в течение всего процесса формовки поддерживать в очаге деформации постоянным напряжением течения ($d\sigma_3=0$), что обеспечивает и постоянную скорость деформации ($\dot{\epsilon}_e = const$). Расчёт давления формовки p_i проведён из условия равновесия сил на границе очага деформации при проецировании их на вертикальную ось с учётом геометрических соотношений панели.

Уравнение для определения давления формовки имеет вид:

$$p_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{t} \frac{\bar{H}_i}{1 + \bar{H}_i^2}. \quad (1.2)$$

где σ_{S_3} – напряжение течения материала заполнителя в режиме сверхпластичности;

S_{30} – исходная толщина ребра заполнителя;

t – шаг ребра гофра;

\bar{H}_i – текущая относительная высота панели.

Текущая относительная высота определяется зависимостью:

$$\bar{H}_i = \frac{H_i}{a_0}, \quad (1.3)$$

где H_i – текущая высота панели;

a_0 – первоначальная длина ребра гофра.

Из условия постоянства интенсивности скорости деформации определено время формовки заполнителя:

$$\tau_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\epsilon_e} \ln \frac{a_i}{a_0} = - \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\epsilon_e} \ln \frac{S_{3i}}{S_{30}}, \quad (1.4)$$

или с учётом равенства (1.3):

$$\tau_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\ln(1+\bar{H}_i^2)}{\dot{\varepsilon}_e}. \quad (1.5)$$

Из уравнений (1.2) - (1.5) получена прямая зависимость давления от времени $p(\tau)$:

$$p_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{n\sigma_{S_3} S_{30}}{B} \right) \sqrt{1 - e^{-\sqrt{3}\dot{\varepsilon}_e\tau_i}} e^{-\frac{\sqrt{3}}{2}\dot{\varepsilon}_e\tau_i}. \quad (1.6)$$

Таким образом, в работах определены зависимости (1.2) и (1.6), которые позволяют рассчитать кривые нагружения $p(H)$ и $p(\tau)$ для формовки гофрового заполнителя трёхслойных плоско-параллельных конструкций. На рисунке 1.16 показан характер кривых нагружения, построенных по результатам расчёта для гипотетического материала для различных скоростей деформации и напряжений течения.

Однако зависимости (1.5) и (1.6), как было описано ранее, не учитывают прогиб обшивки в процессе формовки между зонами диффузионной сварки, что может явиться причиной возникновения брака в виде утяжин.

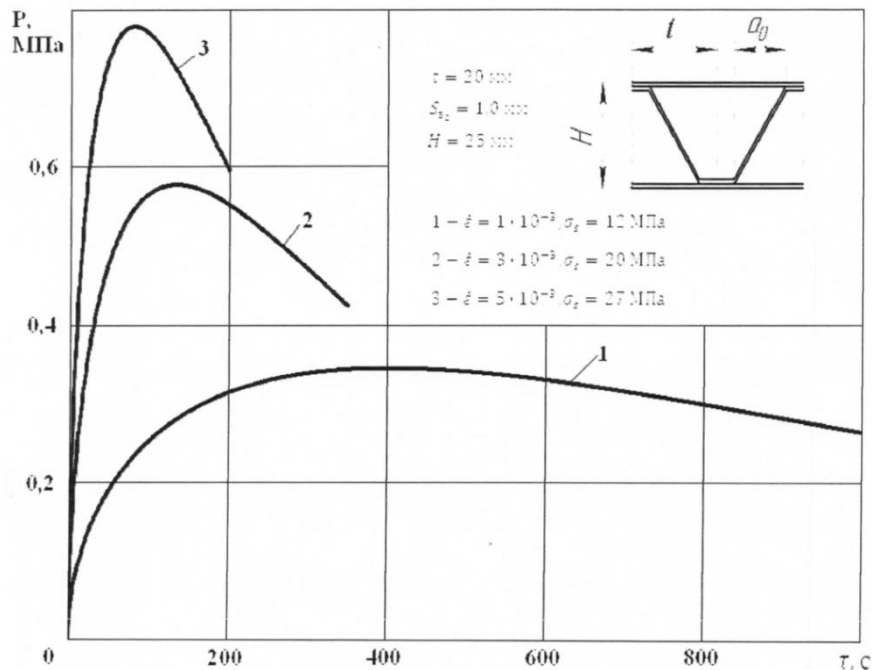


Рисунок 1.16 – Кривые нагружения по результатам расчета

После окончания формообразования заполнителя (с момента касания нижней обшивкой дна матрицы) необходимо проведение формовки - калибровки боковых и угловых участков панели до полного воспроизведения конфигурации матрицы. Для этого требуется дальнейшее регулирование величины давления газа.

В работе Бирюкова Н.М. и Смирнова В.А. [5] рассмотрена задача определения необходимого давления для формовки-калибровки угловой зоны панели. В условиях предложенного способа рассмотрены два основных варианта конструктивного исполнения боковых участков панели (рисунок 1.17):

- боковой участок образован одной деформированной обшивкой;
- боковой участок образован деформированными листами обшивки и заполнителя, сваренными между собой диффузионной сваркой.

По этим схемам образование бокового участка панели происходит либо за счёт деформации участка C_y нижней обшивки (вариант 1), либо за счёт деформации участка C_y , образованного сваренными между собой листами обшивки и заполнителя (вариант 2), под действием равномерно распределённого давления p , изменяющегося во времени.

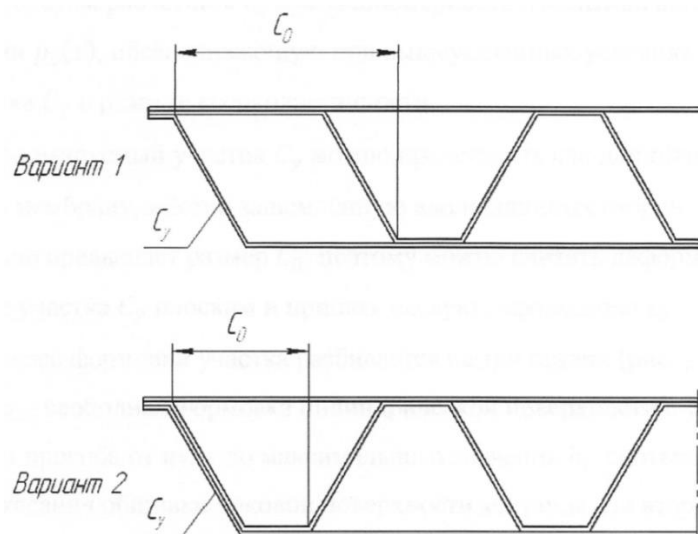


Рисунок 1.17 - Варианты конструктивного выполнения боковых участков панели

С целью исключения искажения геометрии крайних гофров и образования складок на обшивке по линиям сопряжения крайних ребер заполнителя с нижней обшивкой при формовке выявлены условия:

1) обеспечение постоянства величин проекций двух крайних ребер заполнителя на поверхность верхней обшивки, то есть необходимо обеспечить перемещение точки M строго перпендикулярно поверхности верхней обшивки (рисунок 1.18);

2) ограничение величины прогиба h участка C_y касательного к поверхности нижней обшивки в точке M .

Реализация этих условий возможна только при определённом соотношении $\frac{c_0}{a_0}$ для заданных толщин обшивки и заполнителя.

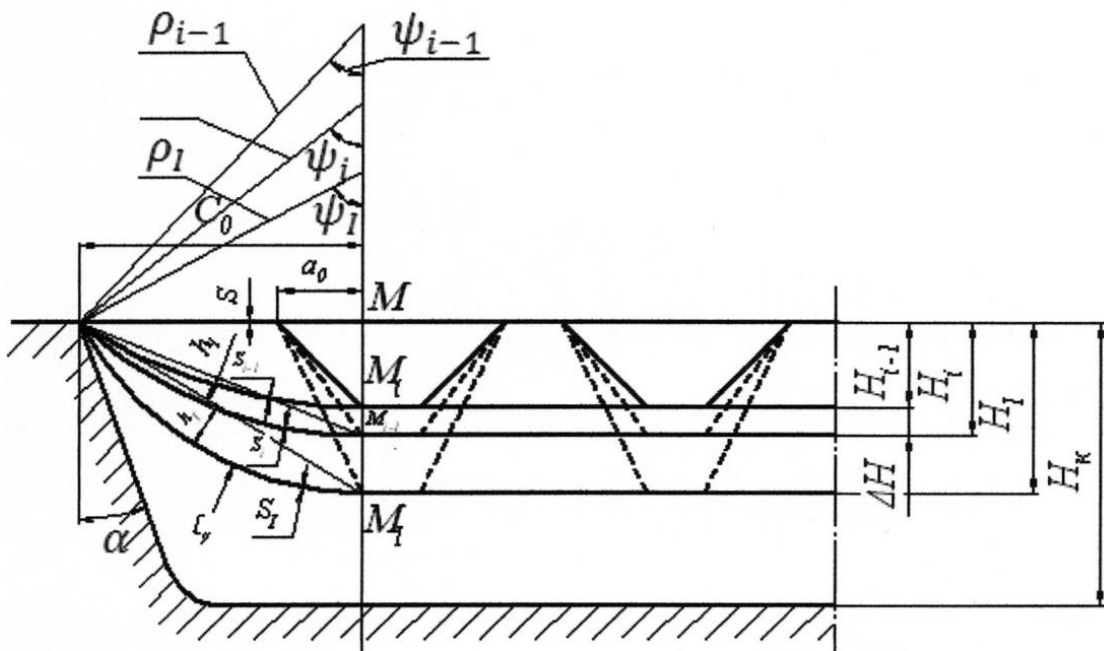


Рисунок 1.18 – Перемещение точки M в процессе формовки панели

Расчётным путём в работах определена закономерность изменения давления газа во времени $p_c(\tau)$, обеспечивающая формовку при соблюдении вышеуказанных условий деформации участка C_y в режиме сверхпластичности. Процесс формовки участка разбивается на три стадии. Первая стадия -

свободная формовка цилиндрической поверхности с увеличением высоты прогиба от нуля до максимального значения h_I , соответствующего моменту касания обшивкой боковой поверхности матрицы. На второй стадии в зависимости от высоты панели оформляется боковая стенка, либо донный участок обшивки. На третьей стадии происходит формовка - калибровка угла с последовательным уменьшением радиуса сопряжения стенки с дном до конечного минимального значения r_q .

С учетом равенств $\sigma_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s$ и $\rho_z = \infty$ определено давление формовки обшивки на участке C_y :

$$p_{c_i} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{s_0} \frac{S_{c_i}}{\rho_i}, \quad (1.7)$$

где σ_{s_0} – напряжение течения материала обшивки;

S_{c_i} – текущая толщина на участке C_y ;

ρ_i – текущий радиус кривизны срединной поверхности очага деформации.

В соответствии с условием несжимаемости из условия постоянства скорости деформации определяется приращение времени формовки на каждой стадии:

$$\Delta\tau = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\dot{\varepsilon}} \frac{\Delta S}{S}. \quad (1.8)$$

Выражения (1.7) и (1.8) являются исходными для расчётов по всем стадиям формовки.

Дальнейшая задача сводится к определению параметров радиуса кривизны срединной поверхности ρ и толщины S в очаге деформации в текущий момент и может быть решена методом численного интегрирования. Расчёт ведётся поэтапно с разбиением процесса формовки на ряд N последовательных этапов деформирования на каждой стадии формовки.

В работе [5] рассмотрены основные стадии процесса формовки бокового участка панели, представленные на рисунке 1.19.

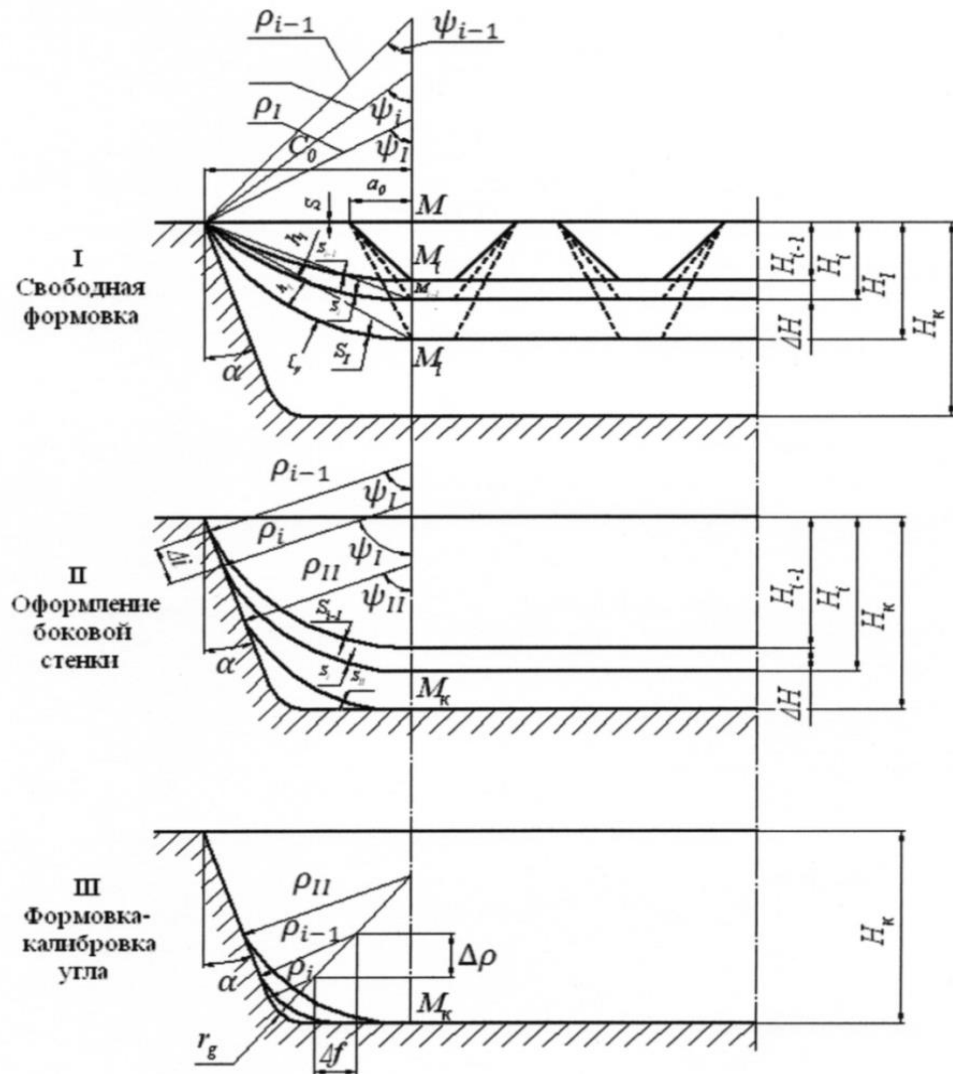


Рисунок 1.19 - Стадии формовки бокового участка панели

Каждому этапу i при этом соответствует заданное изменение характеристик параметров: прогиба h участка C_y , высоты панели H и радиуса кривизны срединной поверхности ρ в очаге деформации.

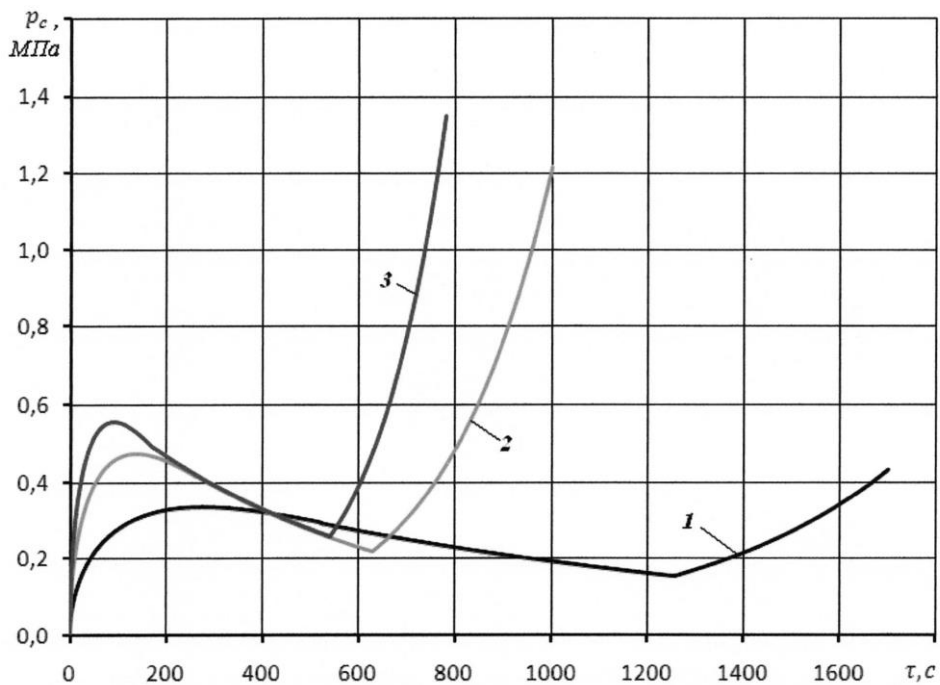
Зависимости (1.7) и (1.8) в этом случае имеют вид:

$$p_{ci} = \frac{2 \sigma_{s0} S_{ci}}{\sqrt{3} C_0 \rho_i}, \quad (1.9)$$

где $\bar{\rho}_i = \frac{\rho_i}{C_0}$ – относительный радиус кривизны срединной поверхности очага деформации;

$$\Delta\tau = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\dot{\epsilon}} \frac{S_{i-1} - S_i}{S_{i-1}}. \quad (1.10)$$

Рассчитанные кривые изменения давления по времени при формовке бокового участка панели показаны на рисунке 1.20. Анализ приведённых кривых свидетельствует о сложном характере изменения давления формовки во времени.



$$\bar{H}_c = 1; r_g = 5 \text{ мм}; S_0 = 1,0 \text{ мм}; \alpha = 0^\circ.$$

$$1 - \dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}; \sigma_s = 12 \text{ МПа}; 2 - \dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}; \sigma_s = 17 \text{ МПа};$$

$$3 - \dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}; \sigma_s = 20 \text{ МПа}$$

Рисунок 1.20 - Изменение давления формовки бокового участка C_y обшивки по времени: $C_0 = 30 \text{ мм}$

Формообразование бокового участка панели и заполнителя до момента соприкосновения нижней обшивки с дном матрицы происходит при одном и

том же давлении. Следовательно, в каждый момент формовки заполнителя должно выполняться равенство:

$$p_{C_i} = p_{3_i}. \quad (1.11)$$

Анализ приведённых зависимостей, а так же анализ результатов ранее проводимых экспериментальных исследований процесса ПТФ/ДС многослойных панелей показывает, что важно наиболее точно следовать зависимости $p=f(t)$ на стадии формовки ребер многослойных панели. Это обусловлено тем, что на стадии формовки ребер наиболее вероятно возникновение дефектов формовки, таких как утяжины и разрушение заполнителя в очаге деформации из-за нарушения режимов сверхпластического деформирования.

Возникновение дефектов также связано с тем, что в процессе формовки происходит искажение геометрии гофров. При допущении, что соприкасающийся с инструментом материал из дальнейшего формообразования исключается, стадии оформления донной части и углов панели не оказывают влияния на искажение геометрии крайних гофров.

Анализ геометрических соотношений реальных конструкций трёхслойных панелей показывает, что, как правило, $\bar{H}_k \geq ctg\left(\frac{90+\alpha}{2}\right)$. Поэтому можно считать, что только стадия свободной формовки бокового участка C_y влияет на искажение геометрии крайних гофров.

Тогда условие (1.11) преобразуется в вид:

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{(b-a_0)} \left(\frac{\bar{H}_i}{1+\bar{H}_i^2} \right) = \frac{8}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{S_0} S_{C_0}}{C_0} \frac{\bar{H}_i^2 \left(\frac{a_0}{b}\right)^2}{\left[1+\bar{H}_i^2 \left(\frac{a_0}{b}\right)^2\right]^2 \arcsin \left[\frac{2\bar{H}_i \left(\frac{a_0}{b}\right)}{1+\bar{H}_i^2 \left(\frac{a_0}{b}\right)^2} \right]}. \quad (1.12)$$

где b – расстояние между сварными швами.

Рассмотрев начальный момент формовки, когда $\bar{N}_i \ll 1$, из равенства (1.12) после несложных преобразований, отбросив малые второго порядка, находится соотношение $\frac{c_0}{a_0}$, при котором обеспечивается деформирование в условиях сверхпластичности как заполнителя, так и углового участка обшивки C_y :

$$\frac{c_0}{a_0} = \sqrt{2(\bar{b} - 1) \frac{\sigma_{S_0} S_{C_0}}{\sigma_{S_3} S_{3_0}}}. \quad (1.13)$$

$$\text{где } \bar{b} = \frac{b}{a_0},$$

или

$$C_0 = \sqrt{2ta_0 \frac{\sigma_{S_0} S_{C_0}}{\sigma_{S_3} S_{3_0}}}. \quad (1.14)$$

Из выражения (1.13) следует, что значение параметра C_0 зависит от соотношения исходных толщин обшивки и заполнителя и соотношения напряжений течения материала обшивки и заполнителя при заданных значениях \bar{b} и a_0 . Таким образом, варьируя этими значениями, можно обеспечить заданные геометрические параметры боковых участков панели после процесса формовки.

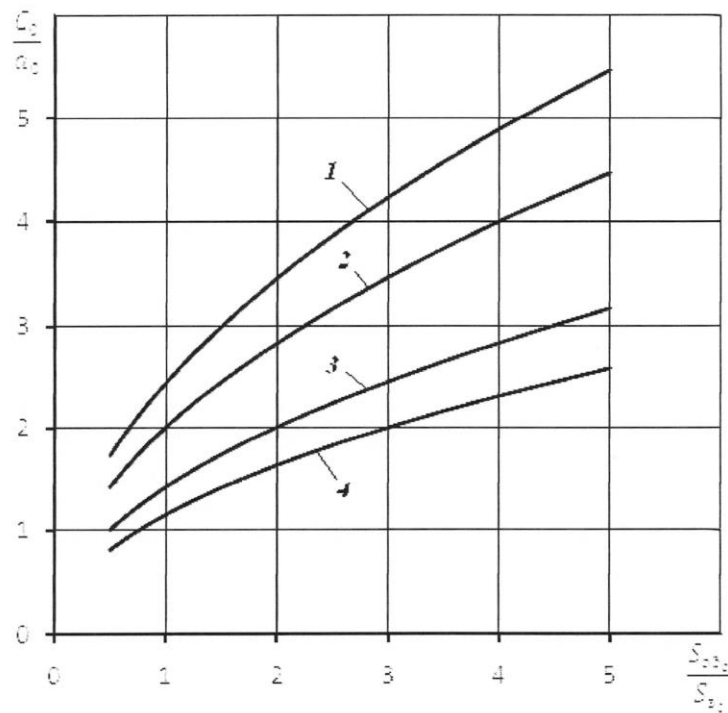
Для заданной оптимальной скорости деформации заполнителя получены соотношения $\frac{c_0}{a_0}$, при которых значения $\dot{\varepsilon}_C$ находились бы в диапазоне проявления эффекта сверхпластичности материала обшивки:

$$\frac{c_0}{a_0} = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi + \alpha}{2} \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi + \alpha}{2 \cos \alpha} \right)^{\frac{2\varepsilon_a}{\dot{\varepsilon}_C}} - 1}, \quad (1.15)$$

$$\frac{c_0}{a_0(\alpha=0)} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2} \right)^{\frac{2\varepsilon_a}{\dot{\varepsilon}_C}} - 1}.$$

По экспериментальной кривой $\sigma_s = f(\dot{\varepsilon})$ определяется напряжение течения материала обшивки σ_{s_0} и заполнителя σ_{s_3} соответствующие значениям $\dot{\varepsilon}_c$ и $\dot{\varepsilon}_a$. Затем, подставив найденные значения σ_{s_0} , σ_{s_3} и $\frac{S_{c_0}}{S_{3_0}}$ в уравнение (1.13), уточняется соотношение $\frac{C_0}{a_0}$.

Типовая зависимость $\frac{C_0}{a_0} = f\left(\frac{S_{c_0}}{S_{3_0}}\right)$ при изготовлении трёхслойной гофровой панели показана на рисунке 1.21.



$$\dot{\varepsilon} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}; \sigma_{s_3} = 20 \text{ МПа. } 1 - \frac{\sigma_{s_0}}{\sigma_{s_3}} = 1; \bar{b} = 4; 2 - \frac{\sigma_{s_0}}{\sigma_{s_3}} = 1; \bar{b} = 3; 3 - \frac{\sigma_{s_0}}{\sigma_{s_3}} = \frac{1}{2}; \bar{b} = 3; 4 - \frac{\sigma_{s_0}}{\sigma_{s_3}} = \frac{1}{3}; \bar{b} = 3$$

Рисунок 1.21 - Зависимость значения $\frac{C_0}{a_0}$ от соотношения исходных

толщин обшивки и заполнителя

Однако искажение геометрии гофров будет происходить и при соблюдении зависимости, полученной авторами, только менее выражено. Полное устранение эффекта искажения гофров, возможно в случае применения

в процессе формовки подвижного элемента оснастки, поддерживающего внешние листы многослойной панели, действительно обеспечивающие вертикальное перемещение точки M в процессе формовки, либо другими технологическими способами.

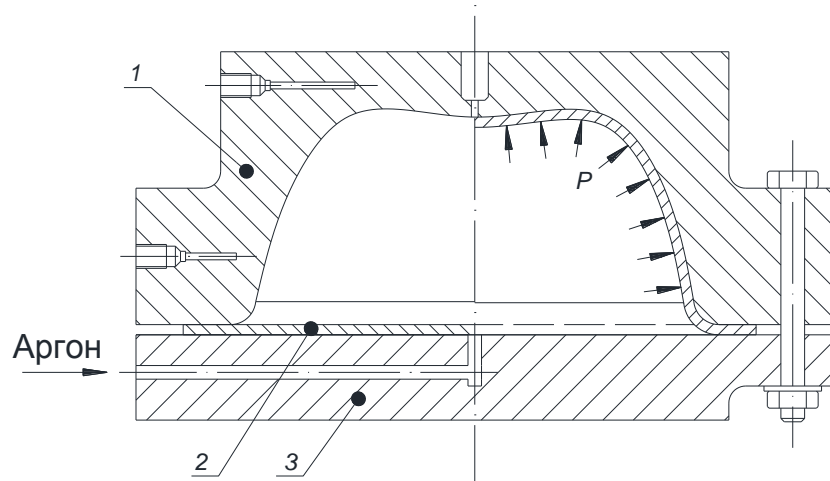
1.5 Оборудование для технологии ПТФ и ПТФ/ДС. Обзор экспериментальных исследований

В настоящее время в качестве оборудования для осуществления технологии ПТФ и ПТФ/ДС используются:

- печи с оснасткой беспрессового формования;
- гидравлические прессы с универсальными блоками и съемной оснасткой;
- специализированные прессы для процесса ПТФ/ДС.

Наиболее простым способом реализации процесса ПТФ является использование печей. В печь помещается технологическая оснастка с зажатой листовой заготовкой 2 (рисунок 1.22). Технологическая оснастка состоит из крышки 3 и матрицы 1. Герметичность обеспечивается механическими прижимами (резьбовые, клиновые и пр.). После нагрева до температуры сверхпластической деформации производится формовка детали избыточным давлением газа в матрицу, подаваемым в герметичную полость крышки.

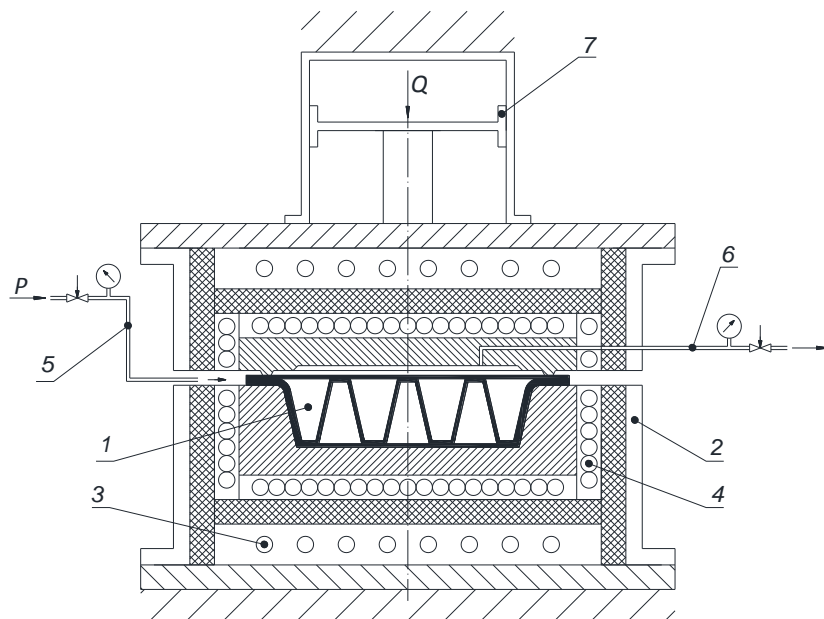
Недостатком способа является опасность разгерметизации полости крышки при нагреве.



1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – крышка

Рисунок 1.22 - Штамп для пневмотермической формовки деталей

Более универсальный способ реализации процесса предполагает использование нагреваемого блока формовки (рисунок 1.23) с применением прессового оборудования для герметизации полости крышки.



1 – многослойная панель; 2 – блок ПТФ; 3 – система охлаждения; 4 – нагреватель; 5 – система подачи аргона; 6 – вакуумная система;
7 – система прижима

Рисунок 1.23 – Принципиальная схема установки ПТФ/ДС

Основным недостатком способа является нерациональное использование дорогостоящего оборудования, обусловленное сочетанием небольшого требуемого усилия и большого рабочего пространства. Другой недостаток способа обусловлен необходимостью выдержки гидравлических прессов под нагрузкой при высоких температурах в течение длительного времени.

Однако на сегодняшний момент в мире предпочтение отдают специализированным установкам для реализации процесса ПТФ и ПТФ/ДС.

В последние годы за рубежом создан ряд фирм, специализирующихся на проектировании и изготовлении оборудования для процессов ПТФ и ПТФ/ДС.

Фирма SAVAGE [92] занимается изготовлением специализированного лабораторного и промышленного оборудования для технологии ПТФ (рисунок 1.24).



Рисунок 1.24 - Прессовое оборудование для изготовления конструкций методом ПТФ фирмы SAVAGE

Фирма Ducommun Incorporated [96] также изготавливает специализированное оборудование для технологии ПТФ (рисунок 1.25).



Рисунок 1.25 - Оборудование для ПТФ фирмы Ducommun Incorporated

На рисунке 1.26 представлены крупногабаритные детали, изготавливаемые фирмой Assidune [80], и оборудование для их изготовления.



а



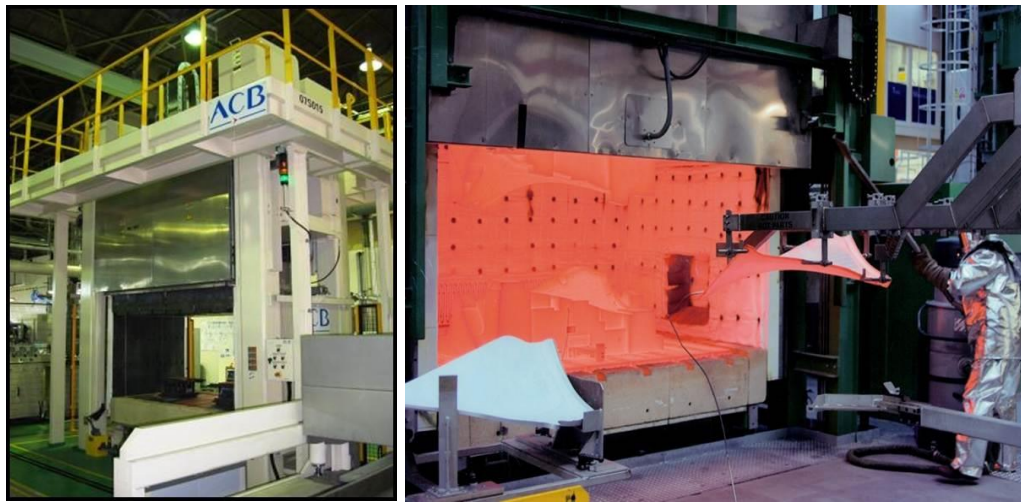
б

а - оборудование для СПФ; б - пример крупногабаритных деталей

Рисунок 1.26 - Оборудование для изготовления крупногабаритных деталей формовкой в режиме СП фирмы Assidune

Французская фирма «АСВ» [79] выпускает целый ряд специализированных установок для процессов ПТФ и ПТФ/ДС с различными

габаритами рабочей зоны. Установка на рисунке 1.27 представляет собою пресс усилием 1000 тс, снабженный системой нагрева оснастки до 930°C. Рабочая зона прессы позволяет установить инструментальную оснастку габаритными размерами 3400x1100мм. Максимальные размеры штампуемых деталей в плане – 3240x940мм. Так как пресс имеет модульную конструкцию, состоящую из нескольких блоков, в случае необходимости размеры рабочей зоны могут быть увеличены.



а

б

а - установка для ПТФ/ДС; б - рабочая зона установки

Рисунок 1.27 - Установка для ПТФ/ДС французской фирмы АСВ

Изделия могут изготавливаться с максимальными габаритами до 3-х метров в длину и 1,5 в ширину.

Для реализации процесса ПТФ и ПТФ/ДС необходимо определить параметры формовки с учётом требования сверхпластичности. Поэтому одной из основных задач изучения процесса ПТФ/ДС является определение технологических параметров процесса формовки, а также особенностей процесса, касающихся возможностей деформирования сплавов в режиме сверхпластичности.

Опыт изготовления многослойных панелей из титановых сплавов методом ПТФ/ДС показывает, что в процессе формовки в определённых условиях возникают дефекты, называемые утяжинами [74]. На рисунке 1.28 представлены утяжины, возникшие в процессе формовки многослойной панели.

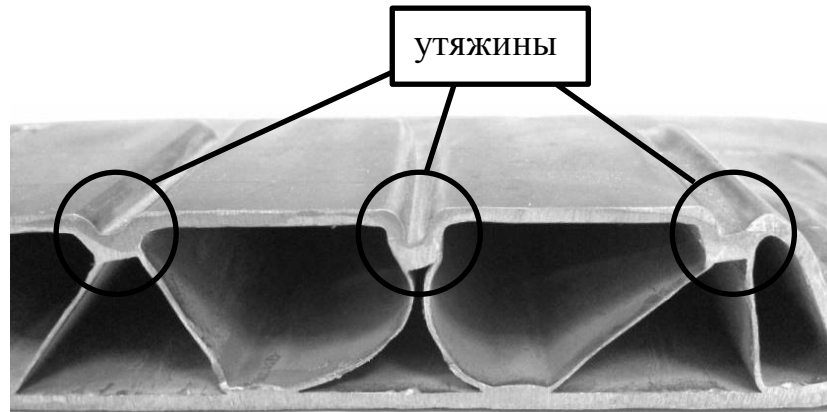


Рисунок 1.28 – Утяжины после ПТФ многослойной панели

Причина этого явления заключается в процессе формовки. В местах, не сваренных с наполнителем, возникают прогибы обшивки, имеющие цилиндрическую форму, так как в зоне диффузионной сварки перемещение обшивки сдерживается ребрами наполнителя, а в свободной зоне обшивка формируется свободно. Утяжины возникают в случаях, когда прогибы превышают критическую высоту, при которой невозможен процесс посадки выпученной обшивки.

Моделирование образования данных неустраняемых дефектов в процессе формовки трёхслойной панели в ПК «SPLEN-O» представлено на рисунке 1.29. В результате моделирования выявлен неправильный выбор начальных размеров панели (параметров наполнителя), что в итоге привело к образованию утяжин в районе перемычек [74].

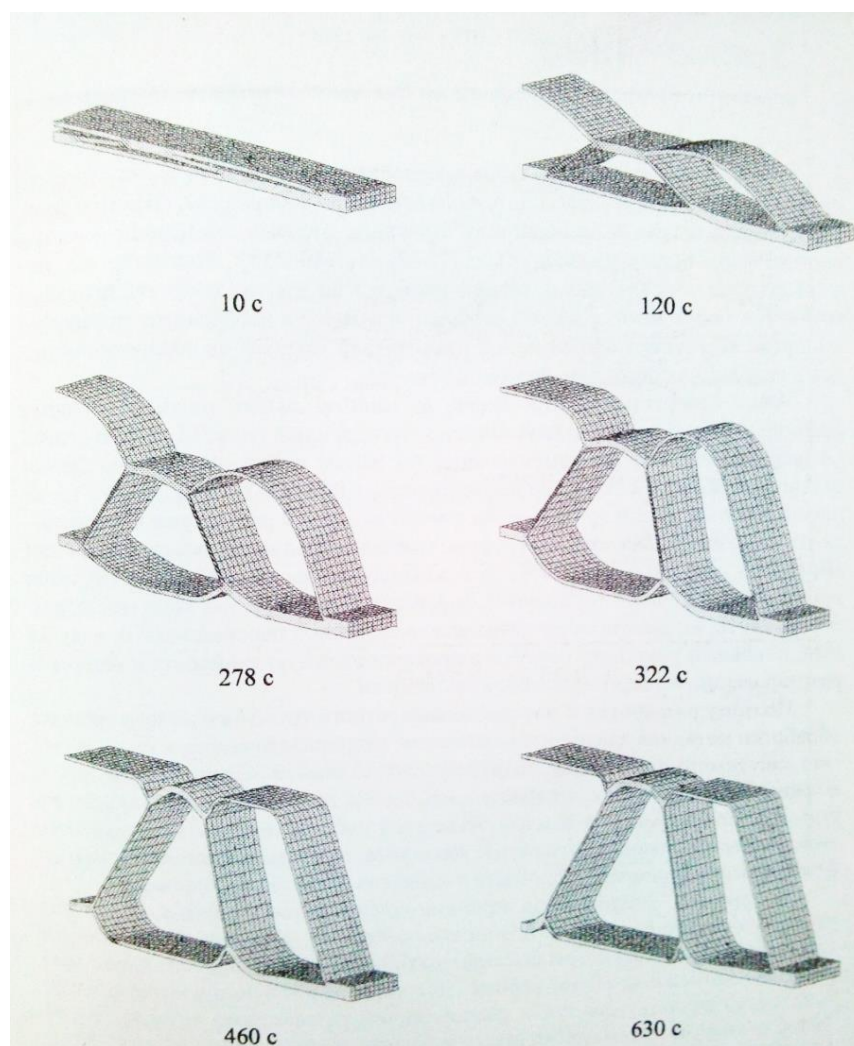


Рисунок 1.29 – Образование утяжин в процессе ПТФ многослойной панели

Анализ результатов моделирования процесса пневмотермической формовки трёхслойной панели выявил возможные причины возникновения утяжин, включающие:

- неправильное назначение конструктивных параметров заполнителя многослойной панели;
- неправильный расчет режимов формовки, например, из-за использования неверных параметров сверхпластичности сплава многослойной конструкции (скорости деформации, коэффициента скоростного упрочнения).

В связи с этим, выявление причин возникновения дефектов в виде утяжин в процессе формовки многослойных конструкций и разработка рекомендаций

по их предотвращению являются актуальными задачами для недопущения брака.

Одним из вариантов предотвращения возникновения утяжин является применение подвижного элемента оснастки, поддерживающего обшивку в процессе формовки и предотвращающим её прогиб, что обеспечит бездефектное изготовление конструкции.

1.6 Выводы. Задачи исследования

Большинство теоретических и экспериментальных работ посвящено исследованию ПТФ плоскопараллельных панелей.

Главной целью этих работ является определение требуемого давления и времени, необходимого для формовки, а также определение предельной степени деформации (технологической возможности процесса). Теоретическому анализу формовки многослойных конструкций переменной высоты, посвящено ограниченное количество работ. Поэтому исследование пневмотермической формовки многослойных клиновидных панелей является актуальной задачей.

Кроме того, широкое освоение ПТФ/ДС многослойных конструкций сдерживается недостаточной изученностью процесса как в теоретическом, так и в практическом плане, отсутствием методов расчета технологических параметров для формовки конструкций с переменной высотой, научно обоснованных рекомендаций по выбору конструктивно-геометрических параметров конструкций и режимов процесса с учётом недопущения образования дефектов формовки.

В соответствии с изложенным 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 клиновидных трёхслойных панелей с различным расположением заполнителя;

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

3) определение технологических параметров пневмотермической формовки клиновидных трёхслойных 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.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Пневмотермическая формовка многослойных панелей в режиме сверхпластичности требует обеспечения постоянной скорости деформации в очаге деформации, которая обеспечивается изменением давления формовки во времени по определённому закону $p=f(t)$.

Определение параметров формовки клиновидных конструкций, в отличие от плоских, усложняется изменяющейся высотой конструкции по сечению. Изменение высоты конструкции приводит к изменению степени деформации ребер и, соответственно, скорости деформации, что, в конечном итоге, приводит к изменению степени утонения ребер заполнителя.

Расчёт параметров формовки клиновидных панелей основывается на деформации заполнителя с учетом условий сверхпластичности.

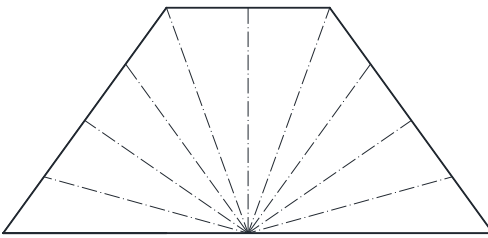
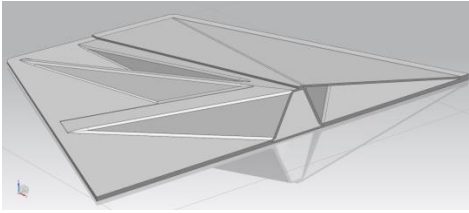
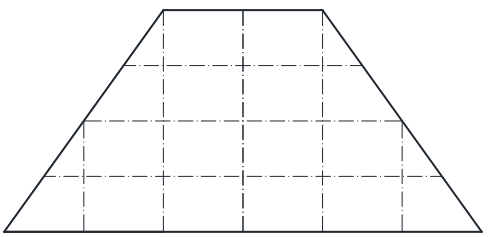
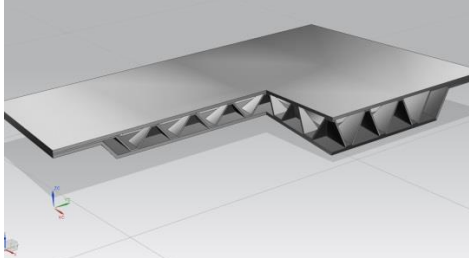
2.1 Клиновидные трёхслойные панели

Клиновидные панели можно подразделить в зависимости от расположения гофрового набора, приведённого в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Клиновидные трёхслойные панели

Расположение гофров	Схема клиновидной панели	Разрез клиновидной панели
С продольным гофровым набором		
С поперечным гофровым набором		

Продолжение таблицы 2.1

С лучевым гофровым набором		
С комбинированным гофровым набором		

От схемы размещения гофрового набора зависят технологические параметры формовки. Клиновидные панели с лучевым и комбинированным гофровым набором являются частными случаями панелей с продольным и поперечным гофровыми наборами.

2.1.1 Клиновидная трёхслойная панель с поперечным гофровым набором постоянного шага ребер

Геометрическая модель клиновидной панели с поперечным гофровым набором представлена на рисунке 2.1, где B – ширина зоны формовки гофровой панели, x_0 и d_0 – участки диффузионной сварки обшивки с гофровым наполнителем, a_j – первоначальная длина ребра гофра (участок наполнителя, не сваренный с обшивками и образующий ребро гофра в результате формовки); l_j – длина образующегося ребра гофра. Представленная клиновидная панель имеет постоянную первоначальную длину ребер гофров, т.е. $a_1 = a_2 = \dots = a_j$.

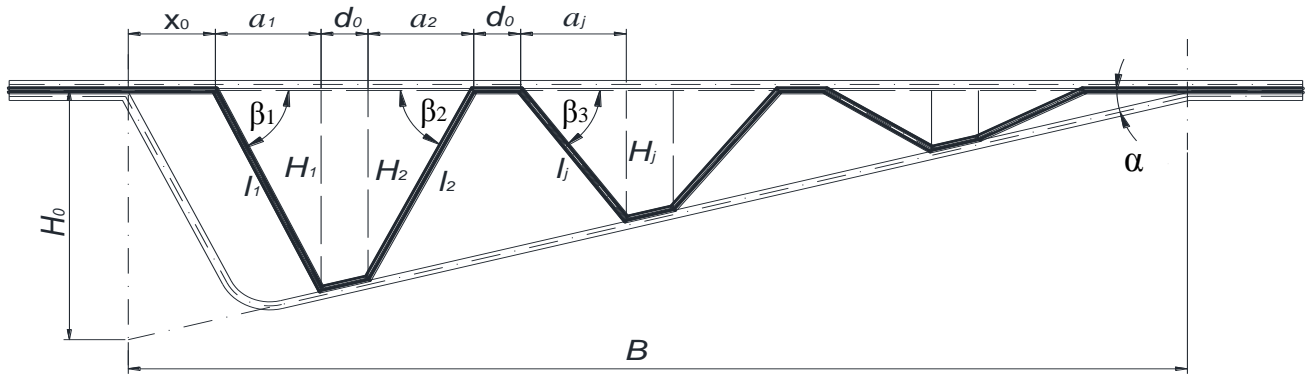


Рисунок 2.1 – Трёхслойная конструкция с поперечными гофрами
постоянного шага ребер

Процесс формовки клиновидной панели с поперечными ребрами постоянного шага проходит неравномерно. В первую очередь окончательно формируются участки панели с наименьшей относительной высотой, тогда как ребра гофров с наибольшей относительной высотой ещё находятся на стадии формовки.

Относительная высота клиновидной многослойной панели определяется зависимостью:

$$\bar{H}_j = \frac{H_j}{a_j}, \quad (2.1)$$

где H_j – высота j -го ребра гофра заполнителя;

a_j – первоначальная длина j -го ребра гофра;

$j = 1, 2, 3, \dots, n$ – номер ребра гофров;

n – общее количество ребер гофров.

Так как у клиновидной панели, представленной на рисунке 2.1, шаг ребер постоянный, то относительная высота панели будет изменяться. В связи с изменяющейся относительной высотой формовки клиновидной панели с постоянным шагом поперечных ребер формовка происходит с разной степенью деформации заполнителя и, соответственно, разным утонением ребер.

2.1.2 Клиновидная трёхслойная панель с продольным гофрированным набором постоянного шага ребер

Клиновидные трёхслойные панели с продольным гофром обеспечивают наилучшую работу конструкции на изгиб при действии момента вдоль гофров. На рисунке 2.2 представлена клиновидная панель с продольными ребрами постоянного шага.

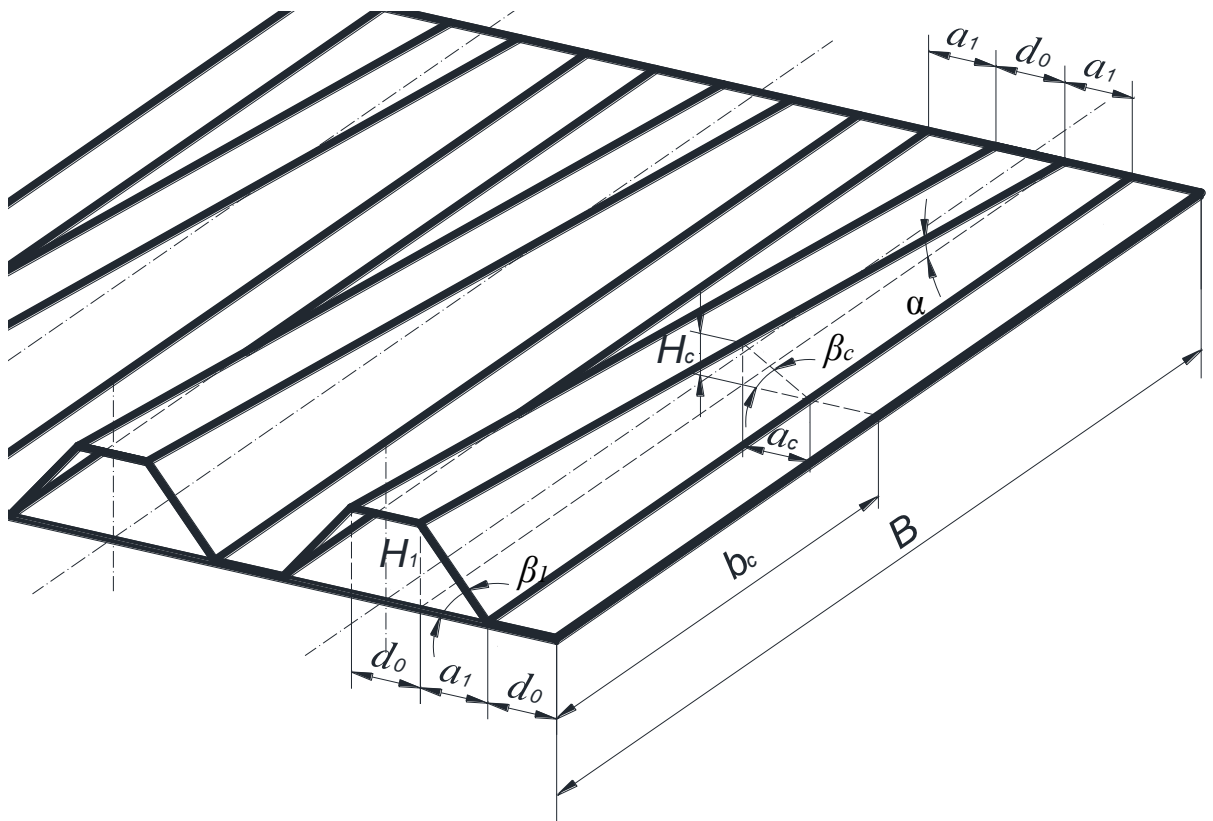


Рисунок 2.2 – Продольный гофрированный набор трёхслойной клиновидной панели постоянного шага ребер

При изготовлении таких конструкций для исключения разрушения при формовке требуется подача давления, определяемого из условия сверхпластической формовки ребра заполнителя в каждом сечении.

Ниже рассмотрены методы определения параметров ПТФ панелей с представленными типами гофрированного набора.

2.2 Определение технологических параметров пневмотермической формовки клиновидных трёхслойных панелей

Известно, что эффект сверхпластичности наблюдается при соблюдении строго определенных температурно-скоростных условий деформирования. Обеспечение постоянной температуры осуществляется за счет применения специального технологического оборудования. Обеспечение постоянных скоростных условий деформирования представляется более сложной задачей и требует строгого регулирования давления газа по ходу процесса. Таким образом, параметрами пневмотермической формовки являются давление p и время τ формовки. Для обеспечения режима сверхпластичности в процессе формовки задается определенный закон изменения давления по времени. Из анализа процесса формовки многослойных панелей в первой главе было выявлено, что на стадии формовки ребер заполнителя существует наибольшая вероятность разрушения конструкции и возникновения дефектов. Поэтому задачей теоретического исследования является получение зависимости давления по времени $p(\tau)$ на стадии формовки ребер заполнителя для изготовления трёхслойных клиновидных панелей с заданными конструктивно-геометрическими параметрами.

2.2.1 Исходные допущения и уравнения

Теоретические исследования выполнены на основе положений теории пластичности с использованием основных общепринятых допущений [26, 48, 55]:

1) схема напряжённого состояния в очаге деформации - плоская, с двумя главными напряжениями σ_1 и σ_2 , действующими в плоскости листа в

продольном и поперечном направлениях. Напряжение, нормальное к срединной поверхности листа в силу малости не учитывается ($\sigma_3 = 0$);

2) деформированное состояние в очаге деформации - плоское, с двумя главными деформациями ε_1 и ε_3 в поперечном и нормальном к образующей ребра заполнителя направлениях. Деформация в продольном направлении отсутствует ($\varepsilon_2 = 0$);

3) материал заготовок изотропен и несжимаем. Деформационное упрочнение отсутствует;

4) закон сверхпластического течения описывается уравнением [17, 18, 28, 49, 52, 55, 56, 60, 64]:

$$\sigma_s = A \cdot \dot{\varepsilon}_e^{m(t,s)}, \quad (2.2)$$

где A и m - константы материала в режиме сверхпластичности;

$\dot{\varepsilon}_e$ - скорость деформации.

5) значения коэффициентов m и A принимаются постоянными в принятом диапазоне изменения скоростей деформации.

При решении задачи использованы следующие основные уравнения [16, 47, 56, 59]:

- уравнение равновесия при проецировании сил на нормаль к поверхности (уравнение Лапласа):

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} - \frac{P}{S} = 0; \quad (2.3)$$

- уравнение пластичности для рассматриваемой схемы нагружения:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}; \quad (2.4)$$

- уравнение связи напряжений и приращений деформации:

$$\frac{d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1}; \quad (2.5)$$

- условие постоянства объёма:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0. \quad (2.6)$$

В основу проведенных расчетов параметров нагружения положен принцип обеспечения контролируемой скорости деформации ребра заполнителя для достижения максимальной степени деформации.

2.2.2 Исследование стадии формовки заполнителя

Решение задачи определения закона изменения давления во времени $p=f(\tau)$ проводится на основе анализа процесса формообразования заполнителя. Для этого использованы выводы, приведённые в работах [5, 40, 41, 43].

Отличие формообразования клиновидной панели от плоско-параллельной заключается в разной степени деформации каждого ребра гофра по ширине панели, что обуславливает различие технологических параметров формообразования каждого ребра.

Рассмотрим процесс формообразования заполнителя клиновидной конструкции с поперечным гофровым набором. Схема напряжённо-деформированного состояния в очаге деформации принимается плоской.

На рисунке 2.3 приведена расчётная схема процесса. Согласно этой схеме формообразование ребер гофра заполнителя происходит под действием силы P_{n_j} за счёт растяжения участков a_j листа заполнителя, не сваренных ни с одной из обшивок. Сила P_{n_j} при формовке ребер панели создаётся давлением газа p_j :

$$P_{n_{j_i}} = p_{j_i} \cdot M_j. \quad (2.7)$$

где p_{j_i} – давление формующего газа на i -ом этапе;

$i = 1, 2, 3, \dots, k$ – этапы формовки;

$M_j = (t_j \cdot L_{\Pi}) / \cos \alpha_i$, – 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 ребра гофра a_j до конечной длины l_{jk} , с одновременным изменением угла наклона ребра к поверхности верхней обшивки от начального значения $\beta_{ji} = 0$ до заданного значения β_{jk} .

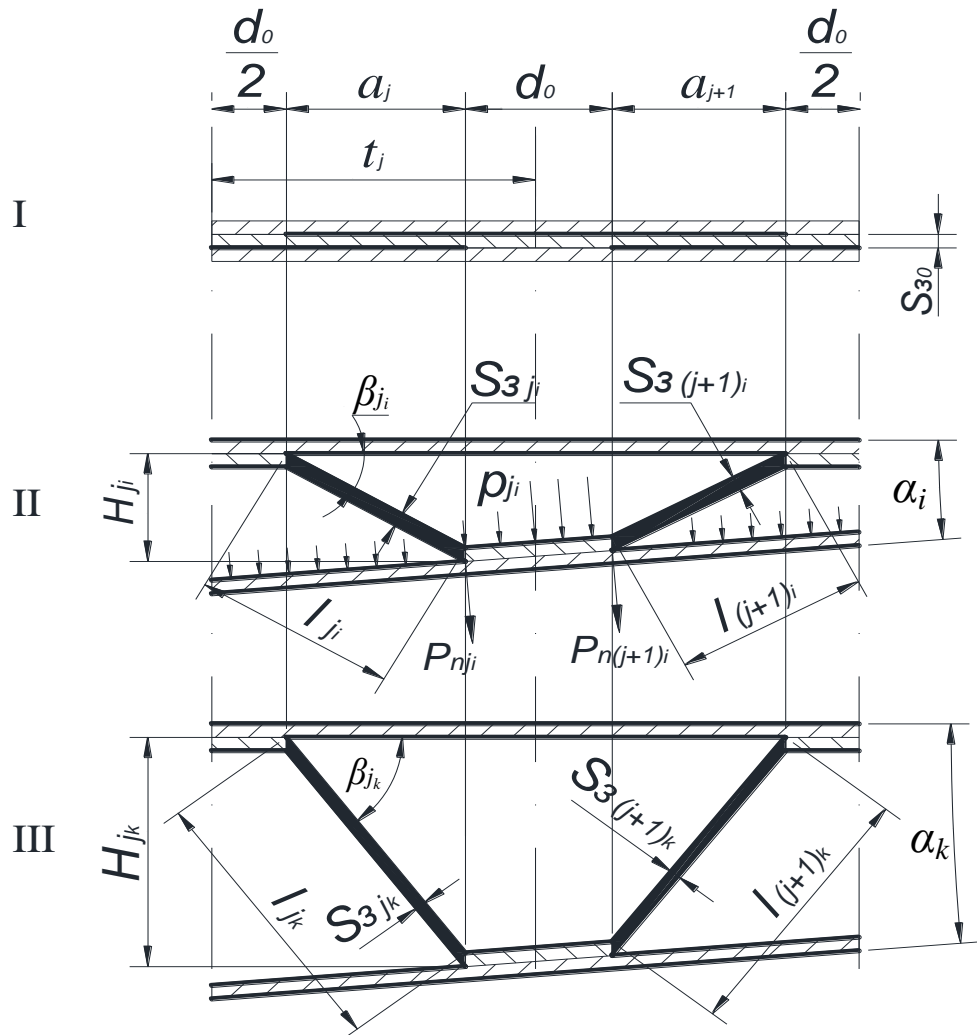


Рисунок 2.3 – Расчётная схема образования ребер гофра заполнителя с учётом зон диффузионной сварки

Для расчёта принимается, что:

- прогиб нижнего листа между сварными участками не учитывается;
- материал зон диффузионной сварки не деформируется в процессе формовки заполнителя, т.к. соединён с внешними листами и жесткость его высока;

- изменение толщины ребра гофра по очагу деформации принимается равномерной.

Для того чтобы деформация листа заполнителя осуществлялась в условиях сверхпластичности, необходимо в течение всего процесса формования поддерживать в очаге деформации постоянными напряжением σ_s и скоростью деформации $\dot{\epsilon}_e$.

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

$$\sum_j^n p_{j_i} t_j / \cos \alpha_i = \sum_j^n \sigma_1 S_{3_{j_i}} \sin \beta_{j_i} / \cos \alpha_i, \quad (2.8)$$

где $S_{3_{j_i}}$ – текущая толщина j -го ребра заполнителя на i -м этапе формовки;

β_{j_i} – угол между j -м ребром гофра заполнителя и плоскостью верхней обшивки клиновидной панели на i -м этапе формовки;

Из геометрических соотношений (рисунок 2.3) и условия постоянства объёма материала, участвующего в деформации, получим:

$$l_{j_i} S_{3_{j_i}} L_{\text{п}} = a_j S_{3_0} L_{\text{п}},$$

где l_{j_i} – текущая длина ребра гофра заполнителя на i -м этапе формовки.

Тогда текущая толщина j -го ребра гофра клиновидной панели определяется уравнением:

$$S_{3_{j_i}} = S_{3_0} \cos \beta_{j_i}, \quad (2.9)$$

$$S_{3_{j_i}} = S_{3_0} \cdot \frac{a_j}{l_{j_i}},$$

$$S_{3ji} = S_{30} \cdot \frac{a_j}{\sqrt{a_j^2 + H_{ji}^2}},$$

$$S_{3ji} = S_{30} \frac{1}{\sqrt{1 + \bar{H}_{ji}^2}}. \quad (2.10)$$

где $\bar{H}_{ji} = \frac{H_{ji}}{a_j}$ – текущая относительная высота j -го ребра гофра клиновидной панели на i -м этапе формовки.

Из условия постоянства объема (2.6) с допущением (2) п. 2.2.1:

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3. \quad (2.11)$$

Из уравнения связи напряжений и деформаций (2.5) и условия (2.11) следует:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}.$$

С учётом равенства (2.11), допущений (1) и (2) п. 2.2.1 определится:

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \sigma_1.$$

Подставив равенство в уравнение пластичности для плоской схемы напряжённого состояния (2.4) получим:

$$\sigma_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S_3}. \quad (2.12)$$

Решение уравнения (2.8) относительно p_{ji} с учётом выражения (2.9) и (2.12) даёт:

$$p_{ji} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{t_j} \sin 2\beta_{ji}, \quad (2.13)$$

где σ_{S_3} – напряжение течения материала заполнителя.

Из геометрических соотношений на рисунке 2.10:

$$\sin 2\beta_{ji} = 2 \sin \beta_{ji} \cos \beta_{ji},$$

$$\sin 2\beta_{j_i} = 2 \cdot \frac{H_{j_i}}{l_{j_i}} \cdot \frac{a_j}{l_{j_i}},$$

$$\sin 2\beta_{j_i} = 2 \cdot \frac{H_{j_i} \cdot a_j}{a_j^2 + H_{j_i}^2}.$$

Разделив числитель и знаменатель дроби правой части на a_j^2 , получим:

$$\sin 2\beta_{j_i} = \frac{2\bar{H}_{j_i}}{1 + \bar{H}_{j_i}^2}. \quad (2.14)$$

С использованием выражений (2.10) и (2.14) уравнение (2.13) может быть записано в виде:

$$p_{j_i} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{t_j} \right) \left(\frac{\bar{H}_{j_i}}{1 + \bar{H}_{j_i}^2} \right). \quad (2.15)$$

Давление формовки для каждого ребра гофра определяется:

$$p_{j_i} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{a_j + d_0} \right) \left(\frac{\bar{H}_{j_i}}{1 + \bar{H}_{j_i}^2} \right). \quad (2.16)$$

Из уравнения интенсивности деформации:

$$\varepsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (2.17)$$

принимая во внимание равенство (2.11), получим:

$$\varepsilon_e = -\frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_3. \quad (2.18)$$

Для рассматриваемого случая однородного напряжённо-деформированного состояния степень деформации заполнителя определяется выражениями:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l_j}{a_j}, \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{S_{3j}}{S_{30}}. \quad (2.20)$$

Из условия постоянства интенсивности скорости деформации $\frac{d\varepsilon}{d\tau} = \text{const}$, используя выражения (2.19) и (2.20), подобно (1.4), определяется время формовки j -го ребра заполнителя:

$$\tau_{ji} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\dot{\varepsilon}_e} \ln \frac{l_{ji}}{a_j} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\dot{\varepsilon}_e} \ln \frac{S_{3ji}}{S_{30}}, \quad (2.21)$$

или с учётом геометрических соотношений (2.10):

$$\tau_{ji} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\ln(1+\bar{H}_{ji}^2)}{\dot{\varepsilon}_e}. \quad (2.22)$$

Выражения (2.16) и (2.22) являются исходными для расчёта кривой изменения давления формовки заполнителя по ходу процесса. Из уравнения (2.13) видно, что в зависимости от необходимого закона изменения угла $\beta_{ji}(\tau)$ можно задавать $p(\tau)$. Прямая зависимость $p(\tau)$ может быть получена следующим образом. Подставив равенство (2.9) в уравнение (2.21), после преобразований получим:

$$\tau_{ji} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\dot{\varepsilon}_e} \ln(\cos \beta_{ji}). \quad (2.23)$$

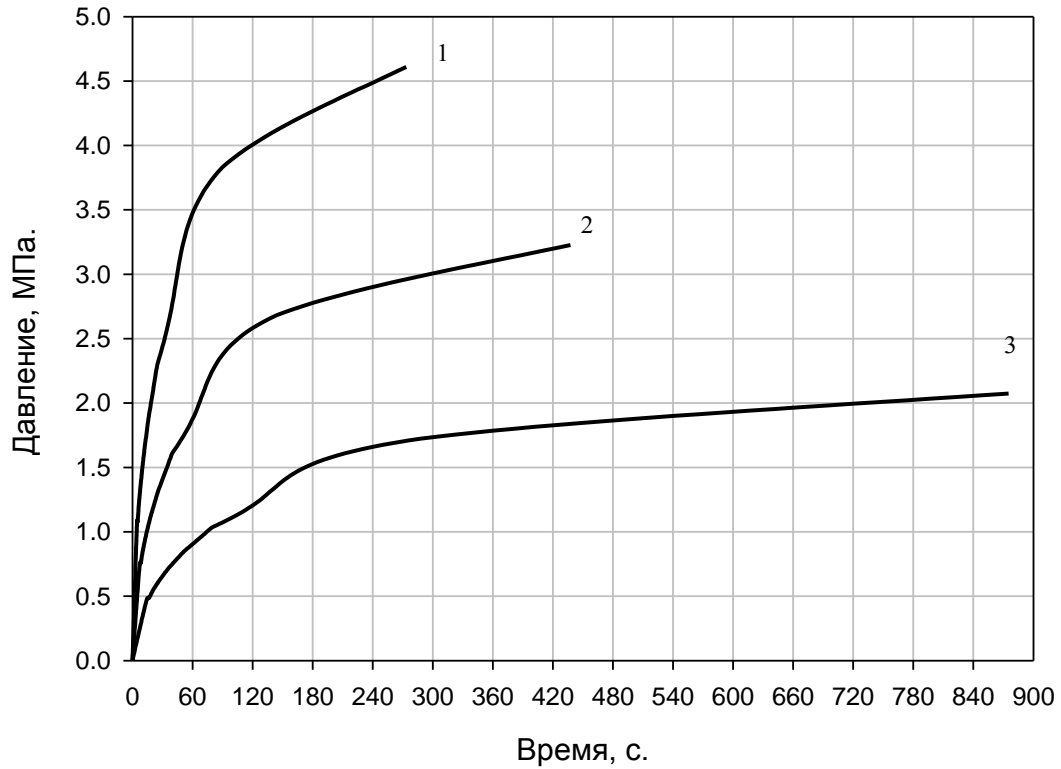
Зависимость изменения угла наклона ребра заполнителя к обшивке β_{ji} от времени формовки с учётом (2.23) определится уравнением:

$$\beta_{ji} = \arccos e^{-\frac{\sqrt{3}}{2} \dot{\varepsilon}_e \tau_{ji}}. \quad (2.24)$$

Тогда прямая зависимость давления от времени формовки $p(\tau)$ из (2.16), используя (2.24), имеет вид:

$$p_{ji} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{a_j + d_0} \right) \frac{\sqrt{e^{\sqrt{3} \dot{\varepsilon}_e \tau_{ji}} - 1}}{e^{\frac{\sqrt{3}}{2} \dot{\varepsilon}_e \tau_{ji}}}. \quad (2.25)$$

На рисунке 2.4 показан характер кривых нагружения в процессе формовки заполнителя трёхслойной клиновидной конструкции для гипотетического материала, построенных по результатам расчёта по формулам (2.22) и (2.25) для различных скоростей деформации и напряжения течения.



$$1- \dot{\epsilon}_e = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}, \sigma_{S_3} = 40 \text{ МПа};$$

$$2- \dot{\epsilon}_e = 1.0 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}, \sigma_{S_3} = 28 \text{ МПа};$$

$$3- \dot{\epsilon}_e = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}, \sigma_{S_3} = 18 \text{ МПа}.$$

Рисунок 2.4 – Кривые нагружения $p_i = f(\tau_i)$ ($S_{30} = 1\text{мм}$, $a_1 = 10\text{мм}$,
 $d_0 = 5\text{мм}$)

Для фрагмента клиновидной трёхслойной панели с гофровым набором, представленным на рисунке 2.5, построен совмещенный график давления по времени на стадии свободной формовки заполнителя.

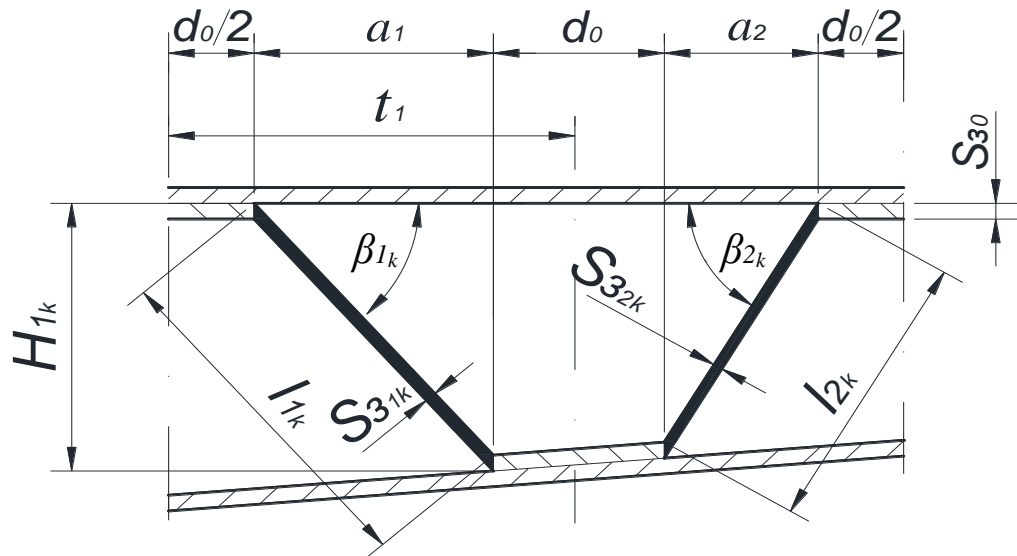
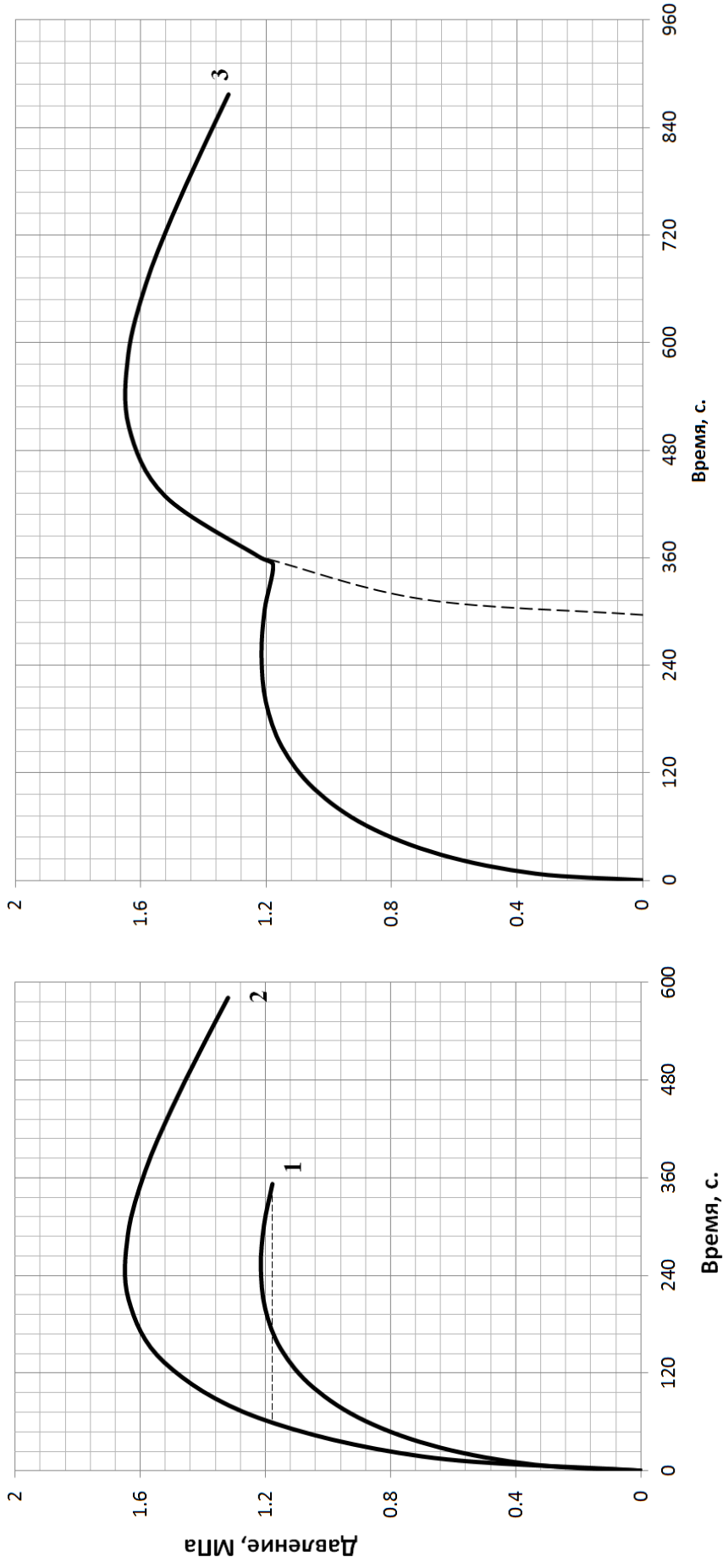


Рисунок 2.5 – Фрагмент панели с гофривым наполнителем ($S_{30} = 1\text{ мм}$;
 $a_1 = 14\text{ мм}$; $a_2 = 9\text{ мм}$; $d_0 = 5\text{ мм}$; $\bar{H}_1 = 1,23$; $\bar{H}_2 = 2$; $\dot{\epsilon}_e = 1,6 \cdot 10^{-3}\text{ с}^{-1}$;
 $\sigma_{S_3} = 40\text{ МПа}$)

Принцип построения совмещенного графика заключается в построении графика с возрастающим давлением во времени и обеспечении требуемого давления для формовки каждого ребра. Последовательность построения совмещенного графика определяется в зависимости от максимального требуемого давления газа для формовки ребер. Графики для формовки каждого ребра гофра панели на стадии свободной формовки наполнителя и принцип построения совмещенного графика давления представлены на рисунке 2.6.

Таким образом, для клиновидной панели с поперечным гофривым набором параметры формовки наполнителя $p_{j_i} = f(\tau_{j_i})$ определяются для каждого ребра гофра по выражениям (2.16) и (2.23) и строится совмещенный график формовки панели $p_i = f(\tau_i)$ на стадии свободной формовки наполнителя.



- 1 – График давления по времени $p_{1_i} = f(\tau_{1_i})$ для формовки первого ребра;
- 2 – График давления по времени $p_{2_i} = f(\tau_{2_i})$ для формовки второго ребра;
- 3 – Совмещенный график давления по времени $p_i = f(\tau_i)$.

Рисунок 2.6 – Совмещенный график давления по времени на стадии свободной формовки заполнителя

Параметры формовки заполнителя $p_i = f(\tau_i)$ для клиновидной панели с постоянным шагом ребер гофра определяются для ребра гофра, имеющего максимальную относительную высоту ($\bar{H}_{j_k} = \max$). Для клиновидной панели с переменным шагом, имеющим постоянную относительную высоту гофров ($\bar{H}_{j_k} = \text{const}$) по ширине конструкции, параметры формовки заполнителя $p_i = f(\tau_i)$ определяются для любого ребра так же, как для плоско-параллельной панели, так как параметры формовки каждого из ребер идентичны между собой.

Процесс формовки заполнителя с продольным гофровым набором представлен на рисунке 2.7.

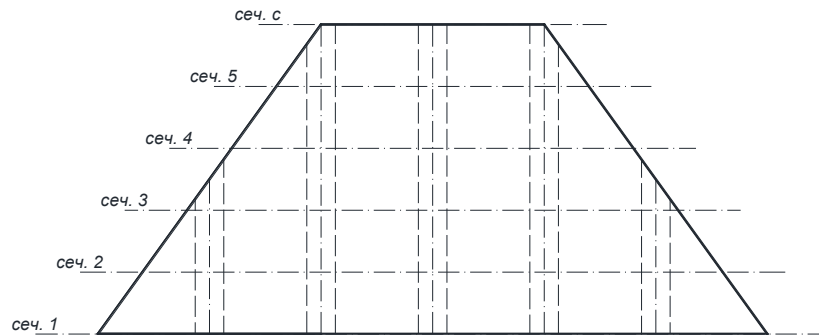


Рисунок 2.7 – Продольный гофровый набор

Текущая толщина ребра гофра клиновидной панели определится аналогично (2.10):

$$S_{3c_i} = S_{30} \frac{1}{\sqrt{1+\bar{H}_{c_i}^2}}, \quad (2.26)$$

Параметры формовки $p_{c_i} = f(\tau_{c_i})$ для продольного гофрового набора постоянного шага ребер определяются для каждого сечения по выражениям:

$$p_{c_i} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{a_{c_i} + d_0} \right) \left(\frac{\bar{H}_{c_i}}{1 + \bar{H}_{c_i}^2} \right), \quad (2.27)$$

$$\tau_{ci} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\ln(1 + \bar{H}_{ci}^2)}{\varepsilon_e}. \quad (2.28)$$

По результатам расчёта строится совмещенный график формовки панели $p_i = f(\tau_i)$, аналогичный показанному на рисунке 2.6.

Параметры формовки заполнителя $p_i = f(\tau_i)$ для клиновидной панели с постоянным шагом продольных ребер определяются для ребра гофра, имеющего максимальную относительную высоту ($\bar{H}_{ck} = \max$). Для клиновидной панели с переменным шагом продольного гофра, имеющим постоянную относительную высоту гофров ($\bar{H}_{ck} = \text{const}$), параметры формовки заполнителя $p_i = f(\tau_i)$ определяются для любого ребра, как для плоскопараллельной панели по формуле (1.6).

2.2.3 Учет боковой зоны при определении параметров нагружения

Для определения условий нагружения в процессе пневмотермической формовки клиновидной панели (рисунок 2.8) необходимо учитывать боковую зону панели. В боковой зоне происходит формовка внутренней обшивки, толщина которой может быть в несколько раз больше толщины заполнителя. Поэтому формовка боковой зоны потребует повышения давления формовки.

Расчёт нагружения при формовке боковой зоны клиновидной панели на стадии свободной формовки выполняется при условии равновесия сил, спроецированных на вертикальную ось, тогда:

$$p_i B = \sum_j^n \sigma_1 S_{z_{ji}} \sin \beta_{ji} + \sigma_1 S_{0i} \sin \beta_{0i}. \quad (2.29)$$

где B – ширина зоны формовки;

S_{0i} – текущая толщина обшивки в концевой зоне на i -м этапе формовки;

β_{0i} – угол между нижней обшивкой и плоскостью верхней обшивки клиновидной панели в боковой зоне на i -м этапе формовки.

Ширина зоны формовки определяется выражением:

$$B = x_0 + \sum_j^n a_j + n \cdot d_0, \quad (2.30)$$

где a_j – первоначальная длина j -го ребра;

x_0, d_0 – ширина диффузионной сварки.

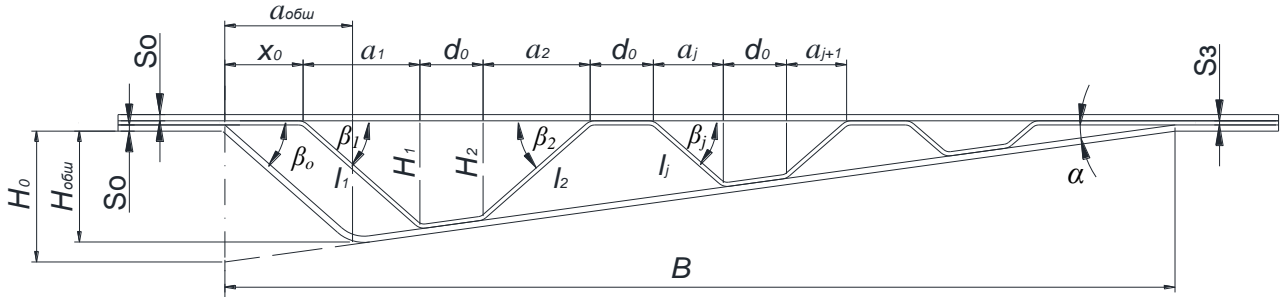


Рисунок 2.8 – Сечение трёхслойной клиновидной панели

Текущая толщина обшивки определяется аналогично (2.9):

$$S_{0_i} = S_0 \cos \beta_{0_i} \quad (2.31)$$

где S_0 – исходная толщина обшивки.

Тогда с учётом (2.9), (2.12), (2.31) уравнение (2.29) принимает вид:

$$p_i B = \sum_j^n \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s S_{30} \cos \beta_{j_i} \sin \beta_{j_i} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s S_0 \cos \beta_{0_i} \sin \beta_{0_i},$$

$$p_i B = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s (\sum_j^n S_{30} \cos \beta_{j_i} \sin \beta_{j_i} + S_0 \cos \beta_{0_i} \sin \beta_{0_i}),$$

$$p_i B = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s (\sum_j^n S_{30} \sin 2 \beta_{j_i} + S_0 \sin 2 \beta_{0_i}),$$

$$p_i B = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s (\sum_j^n S_{30} \sin 2 \beta_{j_i} + S_0 \sin 2 \beta_{0_i}). \quad (2.32)$$

С учётом (2.13) из (2.32) определяется значение потребного формующего давления в боковой зоне:

$$p_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_s}{B} \left(\sum_j^n S_{30} \left(\frac{\bar{H}_{j_i}}{1 + \bar{H}_{j_i}^2} \right) + S_0 \left(\frac{\bar{H}_{обш_i}}{1 + \bar{H}_{обш_i}^2} \right) \right). \quad (2.33)$$

где $\bar{H}_{обш_i} = \frac{H_{обш_i}}{a_{обш}}$ – относительная высота обшивки в боковой зоне на i -м этапе формовки.

При равенстве углов $\beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_j = \beta$, из (2.32) получим:

$$p_i B = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \sin 2 \beta_i (n S_{30} + S_0).$$

Тогда давление формовки определится уравнением:

$$p_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{n S_{30} + S_0}{B} \right) \frac{\bar{H}_i}{1 + \bar{H}_i^2}. \quad (2.34)$$

Для случая клиновидной панели с двумя боковыми зонами (усечённой клиновидной панели), представленной на рисунке 2.9, необходимо учитывать вторую боковую зону.

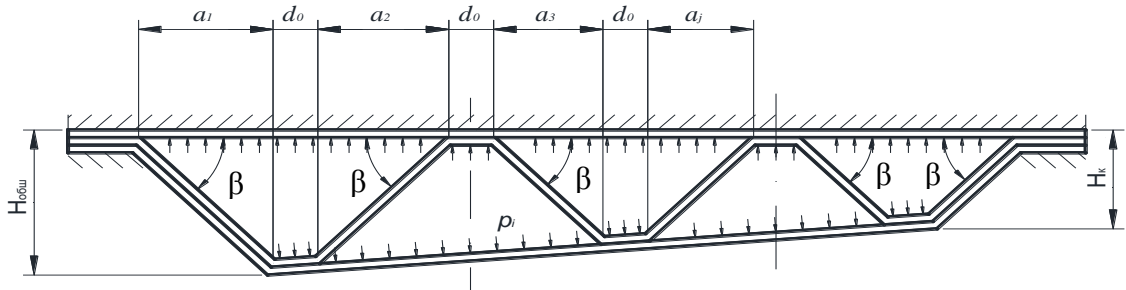


Рисунок 2.9 – Клиновидная панель с двумя боковыми зонами.

Значение формующего давления для клиновидной панели с двумя боковыми зонами:

- в общем виде:

$$p_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_s}{B} \left(\sum_j^n S_{30} \left(\frac{\bar{H}_{j_i}}{1 + \bar{H}_{j_i}^2} \right) + 2 S_0 \left(\frac{\bar{H}_{обш_i}}{1 + \bar{H}_{обш_i}^2} \right) \right); \quad (2.35)$$

- при равенстве углов β :

$$p_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{nS_{30} + 2S_0}{B} \right) \frac{\bar{H}_i}{1 + \bar{H}_i^2}. \quad (2.36)$$

Зависимости (2.33)–(2.36) обеспечивают доформовку концевых зон панели на стадии свободной формовки заполнителя и используются для завершения построения совмещенного графика формовки. Полученные формулы для определения параметров формовки сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 - Зависимости для определения технологических параметров формовки для разных вариантов расположения гофров

Расположение гофров	Потребные давления и время формовки	№ формулы	Зависимость давления от времени формовки	№ формулы
С поперечным гофровым набором постоянного шага	$p_{ji} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{a_j + d_0} \right) \left(\frac{\bar{H}_{ji}}{1 + \bar{H}_{ji}^2} \right),$ $\tau_{ji} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\ln(1 + \bar{H}_{ji}^2)}{\varepsilon_e}.$	(2.16) (2.22)	$p_{ji} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{a_j + d_0} \right) \cdot \frac{\sqrt{e^{\sqrt{3}\varepsilon_e \tau_{ji}} - 1}}{e^{\sqrt{3}\varepsilon_e \tau_{ji}}}.$	(2.25)
С поперечным гофровым набором переменного шага	$p_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{t} \frac{\bar{H}_i}{1 + \bar{H}_i^2},$ $\tau_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\ln(1 + \bar{H}_i^2)}{\varepsilon_e}.$	(1.2) (1.5)	$p_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{n\sigma_{S_3} S_{30}}{B} \right) \cdot \sqrt{1 - e^{-\sqrt{3}\varepsilon_e \tau_i}} e^{-\frac{\sqrt{3}}{2}\varepsilon_e \tau_i}.$	(1.6)
С продольным гофровым набором постоянного шага	$p_{ci} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{a_c + d_0} \right) \left(\frac{\bar{H}_{ci}}{1 + \bar{H}_{ci}^2} \right),$ $\tau_{ci} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\ln(1 + \bar{H}_{ci}^2)}{\varepsilon_e}.$	(2.27) (2.28)	$p_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{n\sigma_{S_3} S_{30}}{B} \right) \cdot \sqrt{1 - e^{-\sqrt{3}\varepsilon_e \tau_i}} e^{-\frac{\sqrt{3}}{2}\varepsilon_e \tau_i}.$	(1.6)
С продольным гофровым набором переменного шага	$p_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{S_3} S_{30}}{t} \frac{\bar{H}_i}{1 + \bar{H}_i^2},$ $\tau_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\ln(1 + \bar{H}_i^2)}{\varepsilon_e}.$	(1.2) (1.5)		
С гофровым набором с учётом боковых зон	$p_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{nS_{30} + S_0}{B} \right) \frac{\bar{H}_i}{1 + \bar{H}_i^2},$ $p_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{nS_{30} + 2S_0}{B} \right) \frac{\bar{H}_i}{1 + \bar{H}_i^2}.$	(2.33) (2.36)		

Таким образом, определены зависимости для определения технологических параметров формовки клиновидных панелей с различным расположением заполнителя с постоянным и переменным шагом ребер гофров. Из расчётов можно сделать вывод, что зависимость давления от времени формовки клиновидной панели идентична зависимости формовки плоскопараллельной панели, однако особенностью формовки клиновидной панели является разнотолщинность заполнителя, которая увеличивается с увеличением угла конусности α .

2.3 Предотвращение возникновения дефектов в процессе формовки многослойных панелей

2.3.1 Прогиб обшивки в процессе формообразования многослойных панелей

При изготовлении многослойных панелей, в том числе клиновидных, из титановых сплавов наблюдается эффект прогиба обшивок, имеющего цилиндрическую форму (рисунок 2.10), в местах не сваренных с заполнителем. Прогиб при посадке обшивки является причиной возникновения дефектов формовки - утяжин [74].

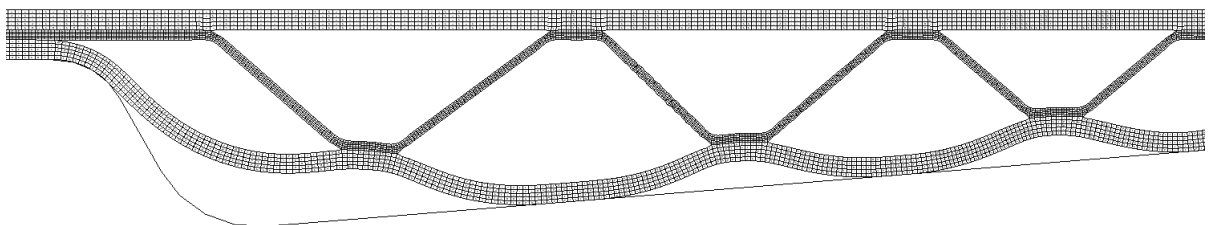

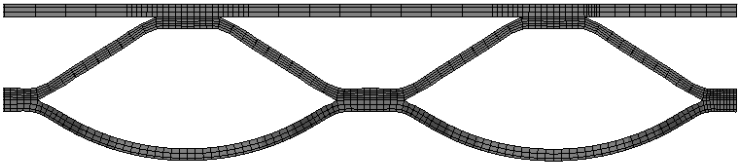
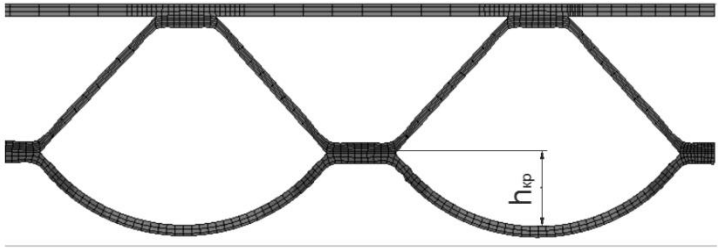
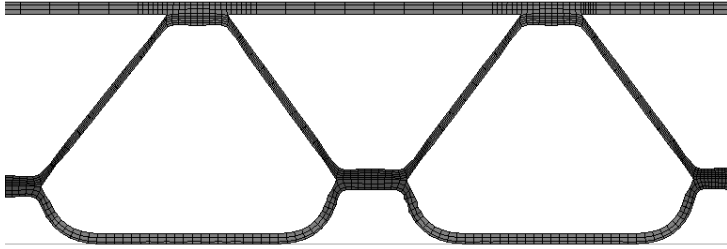
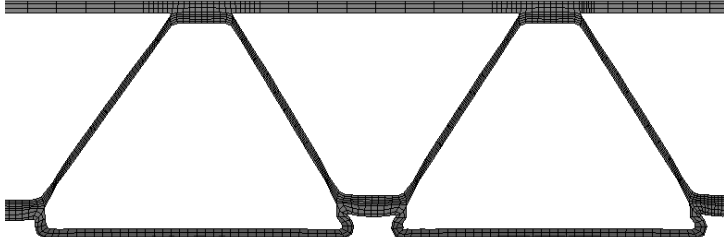


Рисунок 2.10 – Прогиб нижней обшивки при формообразовании панели

Виртуальное моделирование процесса формовки многослойной панели с закреплением верхней обшивки в ПК «MSC Marc» показало, что при образовании прогибов больше некоторой величины, которую можно назвать критической, происходит возникновение утяжин при посадке обшивки (см. таблицу 2.3).

Таблица 2.3 – Образование утяжин в процессе формообразования панели

Этапы	Процесс формообразования многослойной панели
Начало формовки	
Формовка панели, возникновение прогибов	
Формирование прогиба нижней обшивки критической высоты	
Посадка прогибов нижней обшивки	
Окончание формовки, образование утяжин	

Образование прогибов ограничивается сопротивлением материала нижней обшивки деформированию и габаритами оснастки. Величина прогиба обшивки в свободной зоне зависит от параметров материала, режима формовки и габаритов многослойной панели.

Опыт показывает, что основными конструктивными параметрами, определяющими возможность возникновения утяжин, являются:

- соотношение исходных толщин обшивки и заполнителя;
- высота прогиба обшивки;
- ширина прогиба (расстояние между сварными зонами).

Для предотвращения этого явления возникает задача поиска таких комбинаций конструктивных параметров многослойной панели и режимов формовки, при которых происходит формообразование поверхности обшивки без возникновения утяжин. Ниже рассмотрены основные конструктивные параметры, определяющие возможность возникновения утяжин.

2.3.2 Определение критических значений соотношения толщины обшивки и заполнителя

Для определения критических значений соотношения толщин заполнителя и обшивки $\left(\frac{S_{30}}{S_0}\right)$, превышение которых приводит к образованию утяжин, предлагается рассмотреть модель процесса на примере формовки клиновидной панели с образованием прогибов, представленной на рисунке 2.11.

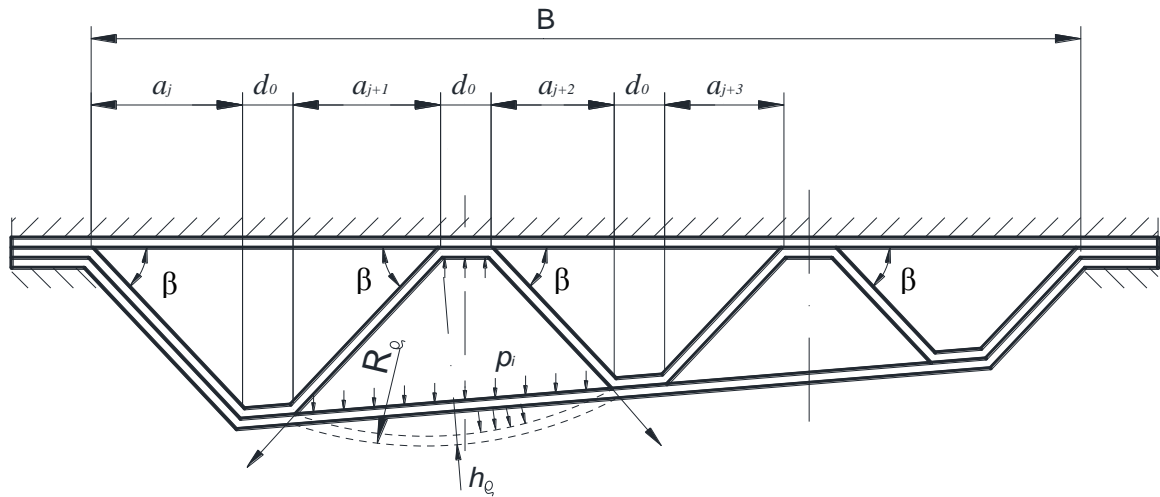


Рисунок 2.11 – Образование прогибов при формовке клиновидной панели

Бездефектная формовка трёхслойной панели возможна, когда давление, необходимое для формовки ребер заполнителя и обшивки будет меньше давления, при котором прогиб обшивки h_0 в неподкреплённых ребрами местах достигнет критического значения $h_{0кр}$, т.е.:

$$p_{max} < p_0, \quad (2.37)$$

где p_{max} – максимальное давление, необходимое для формовки многослойной панели на стадии свободной формовки заполнителя;

p_0 – давление формовки обшивки в неподкреплённых ребрами местах, приводящее к критическому прогибу.

Максимальное давление p_{max} на стадии свободной формовки заполнителя, определяется зависимостью (2.36).

Форма прогиба обшивки (рисунок 2.12), по ширине гофра b_0 может быть описана дугой окружности [43].

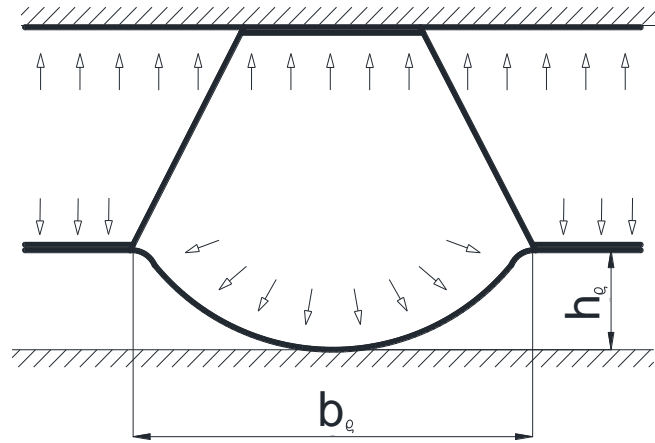


Рисунок 2.12 – Прогиб обшивки при формовке панели

Давление, действующее на обшивку в неподкреплённых ребрами местах, в общем виде, определяется зависимостью [66]:

$$p_{\text{обш}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_S \frac{S_\rho}{R_\rho}, \quad (2.38)$$

где S_ρ - текущая толщина обшивки;

$\rho = 1, 2, 3, \dots$ – порядковый номер гофра;

R_ρ – радиус прогиба обшивки по ширине панели в ρ -ом гофре.

Толщина обшивки в соответствующем гофре S_ρ определяется с учётом скоростных параметров течения:

$$S_\rho = S_0 e^{-\frac{\sqrt{3}}{2} \dot{\epsilon}_e \tau_j}.$$

где τ_j – время формовки наибольшего j -го ребра, принадлежащего ρ -му гофру.

С учётом (2.22) толщина обшивки в районе прогиба определится:

$$S_\rho = S_0 e^{-\frac{1}{2} \ln(1 + \bar{H}_j^2)}, \quad (2.39)$$

где \bar{H}_j – относительная высота наибольшего j -го ребра, принадлежащего ϱ -му гофру.

Радиус прогиба обшивки по ширине гофра R_ϱ может быть определен следующим образом:

$$R_\varrho = \frac{(b_\varrho/2)^2 + h_\varrho^2}{2h_\varrho}, \quad (2.40)$$

где b_ϱ – ширина ϱ -го гофра панели;

h_ϱ – высота прогиба обшивки в ϱ -ом гофре.

На основе изложенных выше зависимостей рассчитывается условие бездефектной формовки.

Ширина ϱ -го гофра клиновидной панели определяется зависимостью:

$$b_\varrho = \frac{a_{j+1} + d_0 + a_{j+2}}{\cos \alpha}. \quad (2.41)$$

Относительный прогиб \bar{h}_ϱ [43] определяется выражением:

$$\bar{h}_\varrho = \frac{h_\varrho}{b_\varrho/2}, \quad (2.42)$$

где h_ϱ – высота прогиба обшивки, b_ϱ – ширина рифта.

Подставив (2.42) в (2.40) получим:

$$R_\varrho = \frac{b_\varrho}{2} \frac{1 + \bar{h}_\varrho^2}{2\bar{h}_\varrho}. \quad (2.43)$$

Подставляя (2.39), (2.43) в (2.38), получим давление на обшивку в неподкрепленных ребрами местах:

$$p_{\text{обш}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_S \frac{s_0 \cdot e^{-\frac{\ln(1 + \bar{H}_j^2)}{2}}}{\frac{b_\varrho}{2} \cdot \frac{1 + \bar{h}_\varrho^2}{2\bar{h}_\varrho}},$$

$$p_{\text{обш}} = \frac{8}{\sqrt{3}} \sigma_S \frac{S_0}{\frac{\ln(1+\bar{H}_j^2)}{e^{\frac{1}{2}} b_\rho}} q.$$

где $q = \frac{\bar{h}_\rho}{1+\bar{h}_\rho^2}$ – коэффициент прогиба.

Тогда давление на обшивку в неподкрепленных ребрами местах, в случае возникновения дефекта определится:

$$p_0 = \frac{8}{\sqrt{3}} \sigma_S \frac{S_0}{\frac{\ln(1+\bar{H}_j^2)}{e^{\frac{1}{2}} b_\rho}} q_{\text{кр}}, \quad (2.44)$$

где $q_{\text{кр}}$ – коэффициент критического прогиба.

Из уравнений (2.36) и (2.44) определяется рекомендуемый диапазон соотношения толщин обшивки и заполнителя в зависимости от прогиба обшивки в неподкрепленных ребрами местах.

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_S \left(\frac{\bar{H}_j}{1+\bar{H}_j^2} \right) \frac{(nS_{30}+2S_0)}{B} < \frac{8}{\sqrt{3}} \sigma_S \frac{S_0}{\frac{\ln(1+\bar{H}_j^2)}{e^{\frac{1}{2}} b_\rho}} q_{\text{кр}},$$

$$\left(\frac{\bar{H}_j}{1+\bar{H}_j^2} \right) (nS_{30} + 2S_0) < \frac{4S_0 B}{\frac{\ln(1+\bar{H}_j^2)}{e^{\frac{1}{2}} b_\rho}} q_{\text{кр}},$$

$$n \frac{S_{30}}{S_0} + 2 < \frac{4B}{\frac{\ln(1+\bar{H}_j^2)}{e^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\bar{H}_j}{1+\bar{H}_j^2} \right) b_\rho}} q_{\text{кр}},$$

$$n \frac{S_{30}}{S_0} < \frac{4 \cdot B}{\left(\frac{\bar{H}_j}{1+\bar{H}_j^2} \right) \cdot e^{\frac{1}{2}} \cdot b_\rho} q_{\text{кр}} - 2,$$

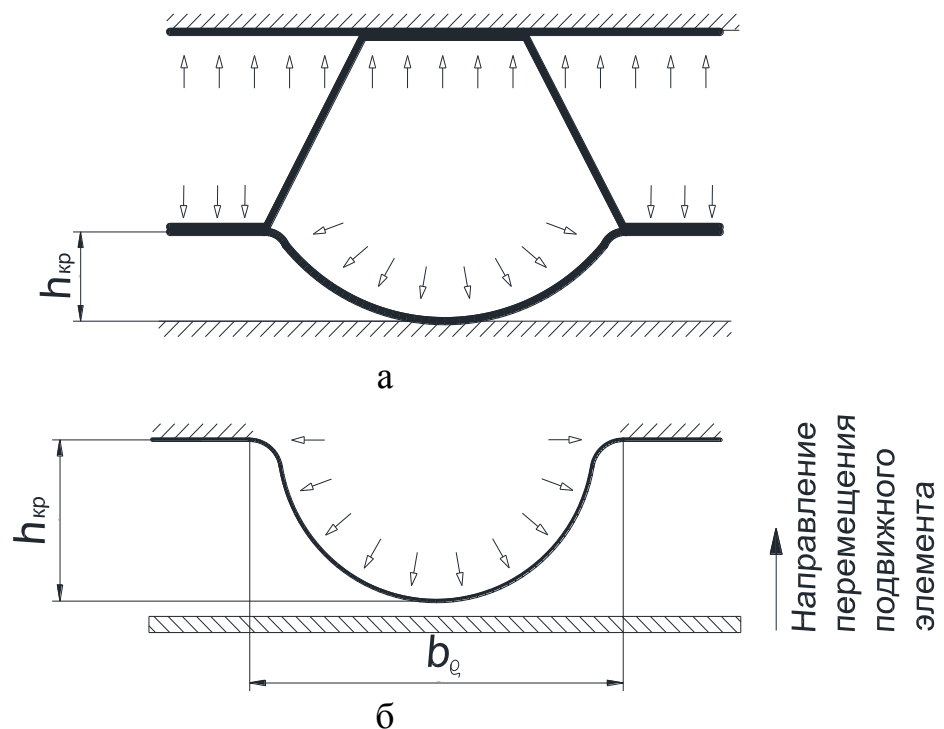
$$\frac{S_0}{S_{30}} > \frac{n}{\frac{4 \cdot q_{\text{кр}}}{\left(\frac{\bar{H}_j}{1+\bar{H}_j^2} \right) \cdot e^{\frac{1}{2}} \cdot b_\rho} \cdot B - 2},$$

$$\frac{S_0}{S_{30}} > \frac{n \cdot b_{\varrho} \cdot \left(\frac{\bar{H}_j}{1 + \bar{H}_j^2} \right) \cdot e^{\frac{\ln(1 + \bar{H}_j^2)}{2}}}{4 \cdot q_{\text{кр}} \cdot B - 2 \left(b_{\varrho} \cdot \left(\frac{\bar{H}_j}{1 + \bar{H}_j^2} \right) \cdot e^{\frac{\ln(1 + \bar{H}_j^2)}{2}} \right)}. \quad (2.45)$$

Таким образом, в результате аналитического исследования определен рекомендуемый диапазон соотношения толщин обшивки и заполнителя в зависимости от относительной высоты многослойных панелей из титановых сплавов (2.45), обеспечивающий формовку без образования утяжин.

2.3.3 Величина критической высоты прогиба

Прогиб нижней обшивки при формовке трехслойной панели идентичен прогибу листа при формовке цилиндрического рифта (рисунок 2.13).



а - посадка критического прогиба; б - посадка отформованного рифта

Рисунок 2.13 – Схема посадки отформованного прогиба

Прогиб, в результате которого нижняя обшивка из-за выпучивания не полностью ложится на оснастку и начинается зарождение утяжины, является критическим. Поэтому для определения условий деформирования, при которых образуются утяжины в процессе формовки трехслойной панели (рисунок 2.13а), был рассмотрен процесс посадки рифта, имеющего толщину и ширину листа равную соответственно толщине обшивки S_0 и ширине гофра панели b_ρ . Посадка отформованного рифта осуществлялась подвижным элементом оснастки (рисунок 2.13б). Высота прогиба, при котором начинала образовываться утяжина, фиксировалась как критическое значение прогиба.

Для определения значения критического прогиба $h_{\rho_{кр}}$ вводится коэффициент критического прогиба $q_{кр}$, который определяется зависимостью:

$$q_{кр} = \frac{\bar{h}_{\rho_{кр}}}{1 + (\bar{h}_{\rho_{кр}})^2}, \quad (2.46)$$

где $\bar{h}_{\rho_{кр}}$ – относительный критический прогиб.

Значение относительного критического прогиба $\bar{h}_{\rho_{кр}}$ определяется по формуле:

$$\bar{h}_{\rho_{кр}} = \frac{h_{\rho_{кр}}}{b_\rho/2}, \quad (2.47)$$

где $h_{\rho_{кр}}$ – величина критического прогиба,

b_ρ – ширина рифта.

Величина коэффициента критического прогиба $q_{кр}$ определяет критические условия формовки панелей с заданными конструктивно-геометрическими параметрами.

Значение величины критического прогиба может быть определено на основе моделирования посадки отформованного рифта для заданного сплава. Определение значений критического прогиба для титанового сплава ВТ20

приведено в разделе 3.1.1. Методом моделирования с условием соблюдения условий сверхпластического деформирования были выявлены значения критической прогиба и занесены в таблицу 3.3.

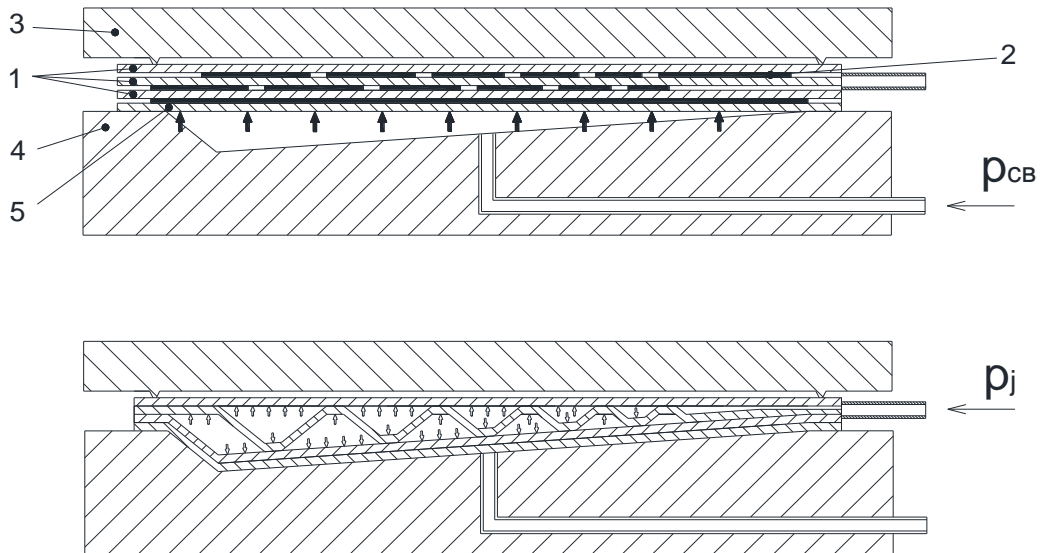
2.4 Технологические параметры процесса ПТФ/ДС клиновидных панелей с подпором обшивок

Диапазон соотношения толщин, рассчитанный из условия (2.45), снижает область применения ПТФ/ДС для изготовления многослойных конструкций. Для реальных конструкций могут потребоваться условия выхода за предельные значения рекомендуемого диапазона соотношения толщин.

Расширить диапазон геометрических параметров конструкций панелей без возникновения утяжин при формовке, при которых не соблюдаются условия (2.45), можно приняв дополнительные меры, к которым относятся [43]:

- 1) использование технологических листов;
- 2) укрупнение зерна микроструктуры обшивки методом предварительной термообработки;
- 3) применение подвижного поддерживающего элемента оснастки [54].

Технологический лист (рисунок 2.14) поддерживает наружную поверхность обшивки и уменьшает величину прогиба. Для предотвращения сваривания с внешним листом, технологический лист покрывают антисварочным покрытием.



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

Рисунок 2.14 – Схема формовки клиновидной трёхслойной панели с технологическим листом

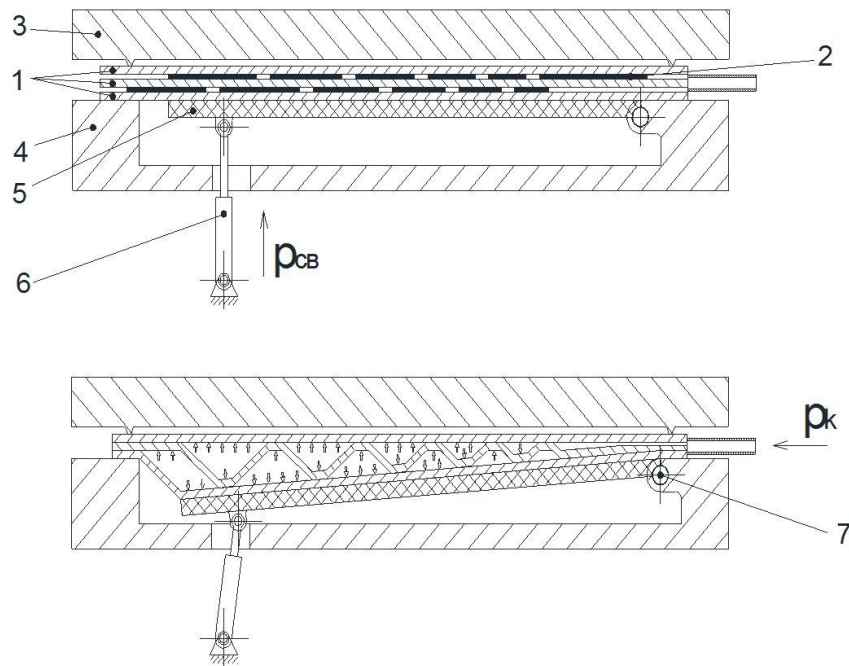
Данный способ требует дополнительного расхода дорогостоящего материала, что будет увеличивать себестоимость процесса и может быть нецелесообразным в определённых условиях.

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

Подвижный элемент оснастки, поддерживающий нижний лист в процессе формовки, является наиболее предпочтительным из предлагаемых вариантов, так как полностью предотвращает выпучивание обшивки, начиная с этапа формовки заполнителя панели.

2.4.1 Определение технологических параметров формовки с подпором обшивки плитой с механическим приводом

Схема процесса ПТФ/ДС клиновидной многослойной панели с подвижным элементом оснастки представлена на рисунке 2.15.



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 2.15 – Схема формовки клиновидной трёхслойной панели с подпорной плитой

Подпорную плиту 5 с механическим приводом 6 необходимо поворачивать относительно оси 7 с угловой скоростью такой величины, при которой не возникают прогибы обшивок в процессе формовки. Угловая скорость вращения подпорной плиты должна обеспечивать скорость деформации ребер заполнителя многослойной панели в режиме сверхпластичности.

Учитывая выше изложенное, угловая скорость поворота подпорной плиты для формовки заполнителя определяется выражением:

$$\omega_i = \frac{\Delta\psi_i}{\Delta\tau_i}, \quad (2.48)$$

где $\Delta\psi_i$ – приращение угла поворота подвижного элемента оснастки;

$\Delta\tau_i$ – приращение времени формовки заполнителя.

Угол поворота подпорной плиты ψ_i зависит от изменения высоты многослойной панели (рисунок 2.8) в процессе формовки и в крайнем положении становится равным углу α . Тогда, приняв граничное условие $\psi_k = \alpha$, можно определить значение угла ψ_k :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\psi_k &= \frac{H_0}{B}, \\ H_0 &= H_1 + (a_1 + x_0)\operatorname{tg}\psi_k, \\ \operatorname{tg}\psi_k &= \frac{H_1 + (a_1 + x_0)\operatorname{tg}\psi_k}{B}, \\ \operatorname{tg}\psi_k \left(1 - \frac{(a_1 + x_0)}{B}\right) &= \frac{H_1}{B}, \\ \operatorname{tg}\psi_k &= \frac{H_1}{B} / \left(1 - \frac{(a_1 + x_0)}{B}\right), \\ \operatorname{tg}\psi_k &= \frac{a_1}{B} \operatorname{tg}\beta / \left(1 - \frac{(a_1 + x_0)}{B}\right), \\ \operatorname{tg}\psi_k &= \operatorname{tg}\beta / \left(\frac{(B - x_0)}{a_1} - 1\right), \\ \psi_k &= \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{tg}\beta}{\left(\frac{(B - x_0)}{a_1} - 1\right)} \right], \\ \psi_k &= \operatorname{arctg} \left[\frac{\bar{H}_1}{\left(\frac{(B - x_0)}{a_1} - 1\right)} \right]. \end{aligned} \quad (2.49)$$

Тогда приращение угла поворота подвижного элемента оснастки определится:

$$\Delta\psi_i = \operatorname{arctg} \left[\frac{\Delta\bar{H}_1}{\left(\frac{(B - x_0)}{a_1} - 1\right)} \right], \quad (2.50)$$

где $\Delta\bar{H}_1 = \frac{\bar{H}_1}{k}$ – приращение относительной высоты первого ребра панели в процессе формовки.

Приращение времени формовки многослойной панели определяется для максимальной относительной высоты \bar{H}_{max_i} :

$$\begin{aligned}\Delta\tau_i &= \tau_{i+1} - \tau_i, \\ \Delta\tau_i &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\ln(1 + ((i+1)\Delta\bar{H}_{max_i})^2)}{\dot{\varepsilon}_e} - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\ln(1 + (i\Delta\bar{H}_{max_i})^2)}{\dot{\varepsilon}_e}, \\ \Delta\tau_i &= \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \dot{\varepsilon}_e} \left(\ln(1 + ((i+1)\Delta\bar{H}_{max_i})^2) - \ln(1 + (i\Delta\bar{H}_{max_i})^2) \right), \\ \Delta\tau_i &= \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \dot{\varepsilon}_e} \ln \left(\frac{1 + ((i+1)\Delta\bar{H}_{max_i})^2}{1 + (i\Delta\bar{H}_{max_i})^2} \right), \\ \Delta\tau_i &= \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \dot{\varepsilon}_e} \ln \left(\frac{1 + (i\Delta\bar{H}_{max_i} + \Delta\bar{H}_{max_i})^2}{1 + (i\Delta\bar{H}_{max_i})^2} \right), \\ \Delta\tau_i &= \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \dot{\varepsilon}_e} \ln \left(\frac{1 + (i\Delta\bar{H}_{max_i})^2 + 2i(\Delta\bar{H}_{max_i})^2 + (\Delta\bar{H}_{max_i})^2}{1 + (i\Delta\bar{H}_{max_i})^2} \right), \\ \Delta\tau_i &= \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \dot{\varepsilon}_e} \ln \left(\frac{1 + (i\Delta\bar{H}_{max_i})^2 + 2i(\Delta\bar{H}_{max_i})^2 + (\Delta\bar{H}_{max_i})^2}{1 + (i\Delta\bar{H}_{max_i})^2} \right), \\ \Delta\tau_i &= \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \dot{\varepsilon}_e} \ln \left(1 + \frac{(2i+1)(\Delta\bar{H}_{max_i})^2}{1 + (i\Delta\bar{H}_{max_i})^2} \right).\end{aligned}\tag{2.51}$$

Подставив (2.50) и (2.51) в (2.48) определим зависимость изменения скорости поворота подпорной плиты ω_i от приращения относительной высоты в процессе формовки:

$$\omega_i = \frac{\sqrt{3} \cdot \dot{\varepsilon}_e}{\ln \left(\frac{1 + (2i+1)(\Delta\bar{H}_{max_i})^2}{1 + (i\Delta\bar{H}_{max_i})^2} \right)} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{\Delta\bar{H}_1}{\left(\frac{B-x_0}{a_1} - 1 \right)} \right).\tag{2.52}$$

Для клиновидной панели с равной относительной высотой ребер $\bar{H}_{1k} = \bar{H}_{2k} = \dots = \bar{H}_{jk}$, угловая скорость поворота подпорной плиты (2.52) при наблюдении режима сверхпластической деформации примет вид:

$$\omega_i = \frac{\sqrt{3} \cdot \dot{\varepsilon}_e}{\ln\left(1 + \frac{(2i+1)(\Delta\bar{H}_i)^2}{1+(i\Delta\bar{H}_i)^2}\right)} \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{\Delta\bar{H}_i}{\left(\frac{(B-x_0)}{a_1} - 1\right)}\right). \quad (2.53)$$

При обеспечении изменения скорости поворота подпорной плиты ω_i по зависимости (2.52) отпадает необходимость регулирования давления формующего газа в процессе формовки, так как режим сверхпластической деформации ребер заполнителя обеспечивается управляемым перемещением подпорной плиты. В этом случае внутрь панели можно подавать постоянное максимальное давление p_k , которое определяется из условия (2.36) при $\bar{H}_i = 1$.

$$p_k = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{nS_{30} + S_0}{B} \right). \quad (2.54)$$

Данный способ формовки требует усложнения конструкции оснастки и контроля процесса.

2.4.2 Определение технологических параметров формовки панелей с подпором обшивки плитой, управляемой противодавлением

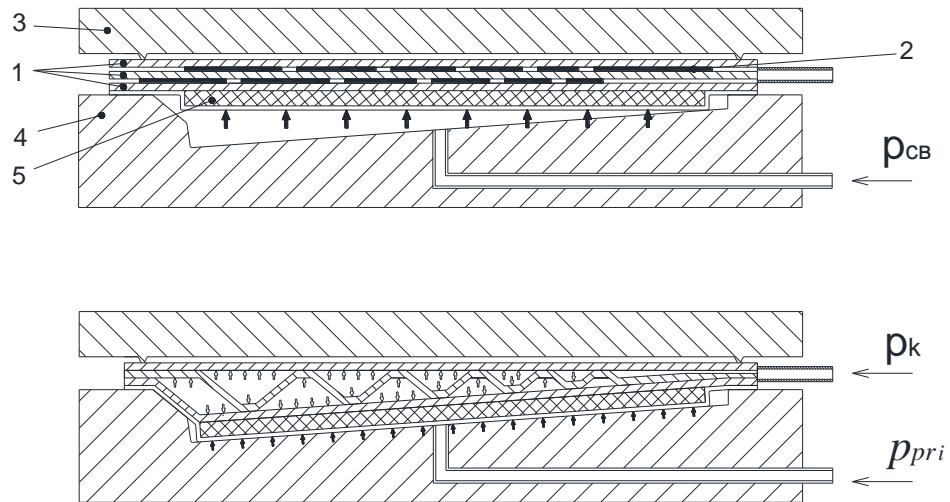
Для упрощения конструкции оснастки для управления подпорной плитой можно применить газовый привод. В данной схеме управляющим воздействием для поворота подпорной плиты может служить противодавление газа p_{pr_i} , действующего на подпорную плиту (рисунок 2.16).

Величина противодавления p_{pr_i} , удерживающего подпорную плиту у обшивки, определяется для максимальной относительной высоты панели из условия:

$$p_{pr_i} = p_k - p_{max_i}. \quad (2.55)$$

где p_k – максимальное давление формовки панели;

p_{max_i} – давление формовки при \bar{H}_{max_i} , определяющееся по выражению (2.36).



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

Рисунок 2.16 – Схема формовки клиновидной трёхслойной панели с противодавлением

Тогда, подставив зависимости (2.36), (2.54) в (2.55), получим:

$$p_{pr_i} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{nS_{30} + S_0}{B} \right) - \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{nS_{30} + S_0}{B} \right) \frac{\bar{H}_{max_i}}{1 + \bar{H}_{max_i}^2},$$

$$p_{pr_i} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{nS_{30} + S_0}{B} \right) \left(\frac{1}{2} - \frac{\bar{H}_{max_i}}{1 + \bar{H}_{max_i}^2} \right). \quad (2.56)$$

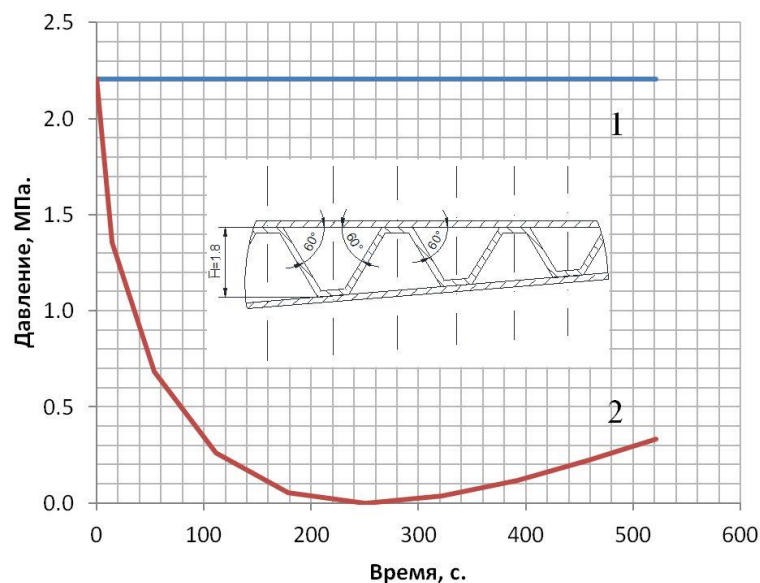
Для клиновидной панели с постоянной относительной высотой ребер ($\bar{H}_j = const$) величина противодействия определится:

$$p_{pr_i} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{nS_{30} + S_0}{B} \right) \left(\frac{1}{2} - \frac{\bar{H}_i}{1 + \bar{H}_i^2} \right). \quad (2.57)$$

Формовка клиновидной панели с постоянной относительной высотой ребер в высокой части панели будет происходить быстрее, чем в низкой, в связи с уменьшающимся шагом ребер. Поворот подвижной плиты будет обеспечиваться неравномерной формовкой ребер панели. Удлинение каждого последующего ребра будет уменьшаться пропорционально изменению шага. При этом скорость деформации материала заполнителя останется постоянной по всей ширине.

Время формовки многослойной клиновидной панели τ_{j_i} определяется выражением (2.22).

На рисунке 2.17, по зависимостям (2.54) и (2.57), рассчитаны законы изменения противодействия для подпорной плиты и подачи давления для формовки многослойной клиновидной панели из титанового сплава ВТ20.



1 – график изменения формирующего давления газа; 2 – график изменения противодействия

Рисунок 2.17 – Зависимость давления газа от времени в процессе формовки

Таким образом, получены следующие зависимости:

- по формуле (2.52), (2.53) определяется скорость поворота подпорной плиты оснастки для формовки клиновидной многослойной конструкции без прогиба нижней обшивки;

- по формуле (2.56), (2.57) определяется противодействие для формовки многослойной клиновидной панели в случае использования подпорной плиты.

2.5 Алгоритм расчета технологических параметров процесса пневмотермической формовки клиновидной многослойной панели

Для практического применения полученных расчетных зависимостей был разработан алгоритм, позволяющий осуществить программную реализацию определения технологических параметров процесса.

В общем случае алгоритм расчета включает в себя следующие этапы:

1) определение сверхпластичных свойств материалов по табличным данным или по результатам испытаний на двухосное растяжение (оптимальная температура и скорость деформации $\dot{\epsilon}_e$ формуемого материала, напряжение течения сплава в режиме сверхпластичности σ_s). Определение свойств материала по результатам испытаний является предпочтительным, т.к. они могут значительно отличаться для различных партий поставки, а также от табличных значений;

2) определение параметров ребер заполнителя;

3) выбор способа формовки. При значении соотношения толщин обшивки и заполнителя не удовлетворяющем зависимости (2.45) выдаётся рекомендация о применении специальных методов формовки;

4) разбиение процесса на i -ое количество этапов на основе анализа геометрических параметров клиновидной многослойной конструкции (в соответствии с необходимой точностью расчетов):

$$\bar{H}_{j_i} = \bar{H}_{j_{i-1}} + \Delta\bar{H}.$$

- 5) определение толщины j -го ребра заполнителя S_{j_i} на i -м этапе формовки;
- 6) определение значения потребного давления формовки j -го ребра заполнителя p_{j_i} на i -м этапе;
- 7) определение времени формовки j -го ребра заполнителя τ_{j_i} на i -м этапе;
- 8) построение совмещенной кривой нагружения $p_i=f(\tau_i)$ для всех этапов формовки.

Для определения параметров формовки клиновидной трёхслойной панели разработано программное обеспечение на языке программирования «Ассемблер». В программу вносятся исходные данные свойств материалов в режиме сверхпластичности, конструктивно-геометрические параметры трёхслойной панели, а также задаётся значение количества расчётных шагов для данного этапа формовки. Интерфейс программы расчёта параметров формовки представлен на рисунке 2.18.

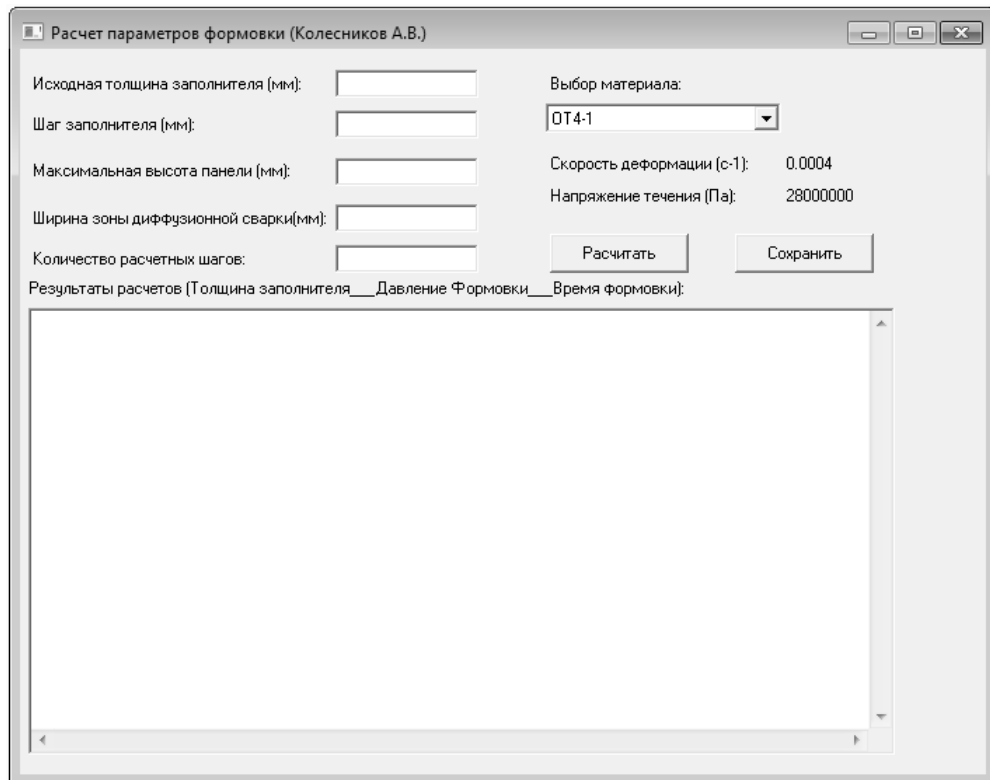


Рисунок 2.18 – Интерфейс программы расчёта параметров формовки трёхслойной панели (этап свободной формовки заполнителя)

Свойства материала автоматически выбираются для выбранного из базы данных титанового сплава (рисунок 2.19).

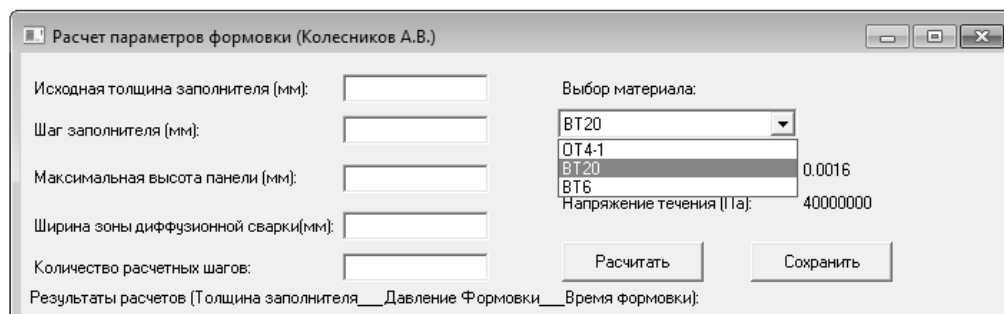


Рисунок 2.19 – Выбор материала трёхслойной панели

Пример расчёта параметров формовки клиновидной трёхслойной панели представлен на рисунок 2.20. В результате расчёта определяется значение толщины заполнителя на каждом этапе, а также параметры давления и времени формовки.

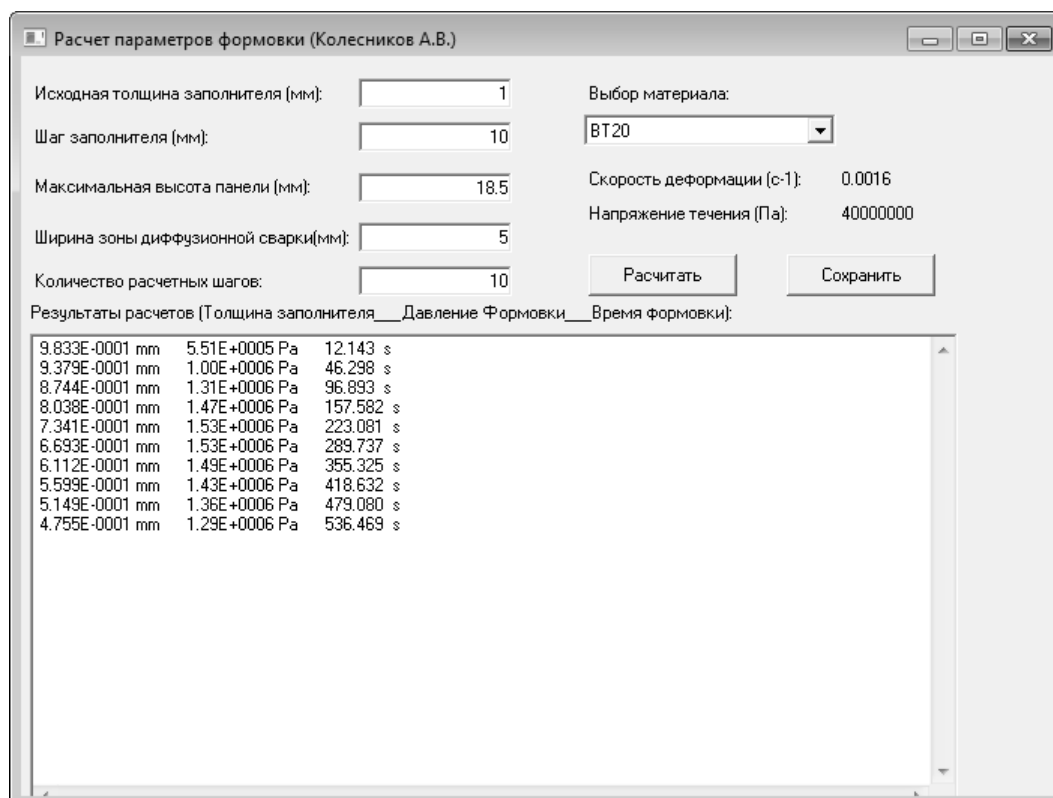


Рисунок 2.20 – Пример расчёта параметров формовки

Рассчитанные данные можно сохранить в формате Excel-файла для дальнейшего их внесения в программу прессы (рисунок 2.21).

	A	B	C
1	Исходная толщина заполнителя (мм):	1,000	
2	Шаг заполнителя (мм):	10,000	
3	Максимальная высота панели (мм):	18,500	
4	Ширина зоны дифф, сварки:(мм)	5,000	
5	Количество расчетных шагов:	10	
6	Материал:	BT20	
7	Скорость деформации (с-1):	0,0016	
8	Напряжение течения (Па):	40000000	
9	Толщина заполнителя(мм)	Давление формовки(Па)	Время формовки(с)
10	0,983	550801,10	12,143
11	0,938	1002114,99	46,298
12	0,874	1306516,92	96,893
13	0,804	1472350,13	157,582
14	0,734	1534933,69	223,081
15	0,669	1531254,69	289,737
16	0,611	1489551,22	355,325
17	0,560	1428415,91	418,632
18	0,515	1359110,44	479,080
19	0,476	1288077,48	536,469

Рисунок 2.21 – Программа формовки в формате Excel-файла

Листинг программы расчёта параметров формовки на языке «Ассемблер» представлен в приложении А.

2.6 Выводы

В результате теоретического исследования получены следующие результаты:

1) получены зависимости для определения требуемого давления и времени пневмотермической формовки, изменяющиеся по ходу процесса и обеспечивающие условия сверхпластического деформирования заполнителя с различным расположением (см. таблицу 2.2);

2) выявлены значения рекомендуемого диапазона соотношения толщин обшивок и заполнителя в зависимости от относительной высоты трёхслойных клиновидных панелей, определяющего качественное изготовление конструкций;

3) для соотношения толщин обшивок и заполнителя, выходящих за пределы рекомендуемого диапазона, требуется проведение формовки с подпором (поддержкой) обшивки панели, с применением подвижной плиты;

4) получены зависимости для определения параметров формовки клиновидных панелей с применением подвижной плиты, перемещающейся механическим путем, либо управляемой противодавлением.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для проверки работоспособности разработанных методик проведена серия экспериментов.

Проведение экспериментов можно осуществлять несколькими способами:

- моделированием процесса формовки;
- проведением натуральных испытаний.

Для сокращения времени анализа и получения результатов, а также снижения последующих материальных затрат в настоящее время широкое распространение получило моделирование технологических процессов с помощью программных средств. Не стала исключением и технология сверхпластической формовки, которой уделено значительное внимание [13, 27, 71, 72, 73, 94, 109].

На сегодняшний момент созданы программные средства, как отечественные, так и зарубежные, позволяющие моделировать процесс пневмотермической формовки: SPLEN (Россия) [86, 89], MSC Marc, PAM-STAMP, Abaqus, FORM-2D и др. Современные программные комплексы позволяют значительно сократить время на подготовку и проведение экспериментов. Таким образом, можно проводить эксперименты как натурные, так и с помощью программных средств.

В работе проведена серия экспериментов с помощью виртуального моделирования, основными задачами которых явились:

- определение величины критического прогиба методом моделирования процесса формовки рифтов в программном комплексе MSC Marc;
- определение условий бездефектной формовки трёхслойных гофрированных панелей.

С целью подтверждения достоверности результатов моделирования, оценки адекватности расчетных зависимостей и работоспособности

разработанных методик определения технологических параметров проведена серия экспериментов по изготовлению моделей трёхслойных клиновидных панелей из титановых сплавов.

Основными задачами экспериментальной работы явились:

- апробирование методики расчёта параметров нагружения, обеспечивающих реализацию процесса ПТФ/ДС трёхслойных клиновидных панелей в режиме сверхпластичности;
- подтверждение работоспособности методик по определению конструктивно-геометрических параметров панели, предотвращающих появление дефектов, проведением экспериментальных формовок клиновидных трёхслойных панелей.

3.1 Виртуальные исследования

3.1.1 Моделирование формовки рифтов

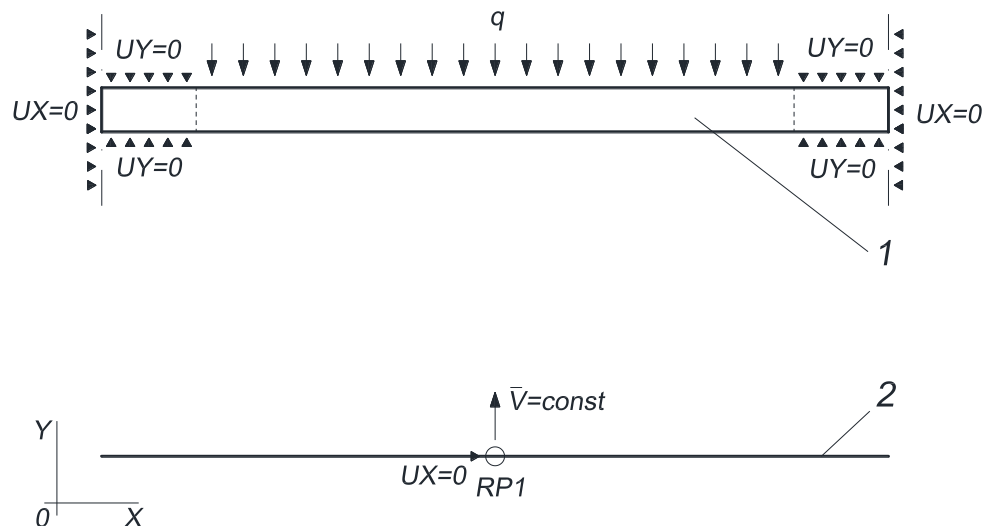
Целью моделирования формовки рифтов является определение величины прогиба критического значения, при котором начинается зарождение утяжины. Решение этой задачи аналитическим методом затруднительно в связи со сложностью формализации процесса посадки прогиба обшивки панели. Поэтому решение поставленной задачи сводится к построению экспериментальной кривой, характеризующей образование утяжин, в зависимости от конструктивно-геометрических параметров рифта, а также параметров материала, методом виртуального моделирования.

Определение прогиба рифта критической высоты (рисунок 2.10б) выполняется с помощью моделирования процесса формирования и посадки рифта на заготовке из титанового сплава в программном комплексе «MSC Marc» в плоскости сечения (2D постановке).

Так как толщина зоны диффузионной сварки равна сумме толщин обшивки и заполнителя, а также поддерживается формирующимися ребрами заполнителя, для моделирования можно принять, что она не деформируется под действием формирующего давления и её можно считать жесткой заделкой.

На рисунке 3.1 представлена схема задачи с граничными условиями. Модель включает в себя деформируемое тело 1, которым является лист заготовки и аналитически жесткое тело 2 (оснастка). Деформируемое тело разбивается на конечно-элементную сетку, состоящую минимум из 5 конечных элементов по толщине. В зоне перехода закрепления фланца к свободной части заготовки сетка была сгущена с сохранением прямоугольной формы. Условие закрепления фланца – жесткая заделка ($UX=0, UY=0, ROTZ=0$). Аналитически жесткое тело имеет возможность перемещаться с постоянной скоростью по направлению к формирующейся заготовке и имеет граничные условия ($UX=0, ROTZ=0$).

К поверхности заготовки приложено давление формовки q . Изменение давления контролируется функцией «Superplasticity Control», которая обеспечивает формовку в режиме сверхпластичности.



1- заготовка; 2 - оснастка

Рисунок 3.1 – Схема задачи с граничными условиями

При моделировании в программе задаются свойства сверхпластичности титанового сплава ВТ20, представленные в таблице 3.1, полученные в результате испытаний на двухосное растяжение (см. таблицу 4.2).

Таблица 3.1 – Свойства сверхпластичности титанового сплава ВТ20

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_s,$ МПа	$\dot{\epsilon} \cdot 10^{-3},$ с^{-1}	m
ВТ20	950	40	1,6	0,42

Схема нагружения заготовки в процессе формовки в ПК «MSC Marc» показана на рисунке 3.2.

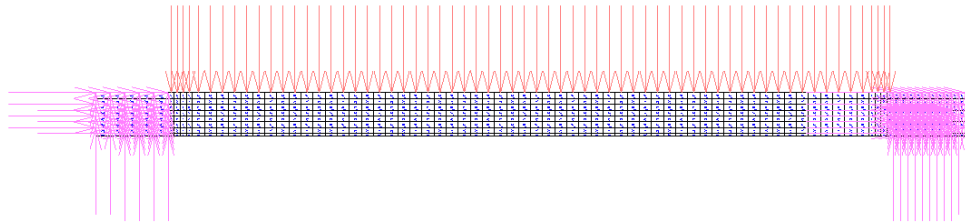
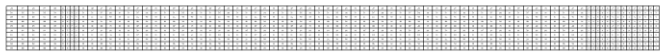
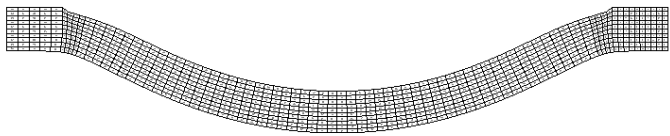


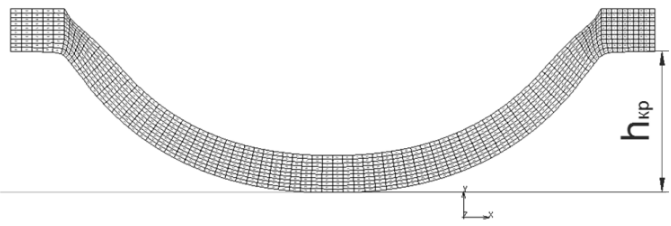
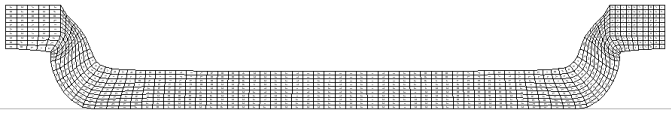
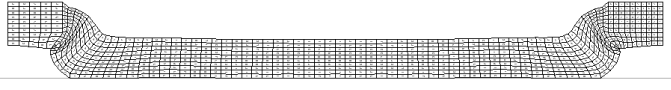
Рисунок 3.2 – Схема нагружения заготовки в ПК «MSC Marc»

Результаты моделирования процесса формирования и посадки рифта из заготовки толщиной 2 мм из титанового сплава ВТ20 представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Формирование утяжины

Стадии процесса	Процесс формирования и посадки рифта
Исходное положение	
Начало формовки	

Продолжение таблицы 3.2

Формирование прогиба до критической величины	
Посадка прогиба и формирование складки	
Образование утяжины (складки)	

В результате моделирования в зоне, прилегающей к зоне диффузионной сварки, возникла утяжина, которая не может быть устранена в реальном процессе формовки, поэтому её возникновение приведёт к дефекту конструкции.

3.1.2 Оценка результатов моделирования

Моделированием возможно выявить высоту прогиба, при которой начинается зарождение дефектов - утяжин, таких как при формовке многослойных конструкций.

Для сплава ВТ20 для различных формовок рифтов определены значения критического прогиба по зависимостям (2.46) - (2.47) и сведены в таблице 3.3.

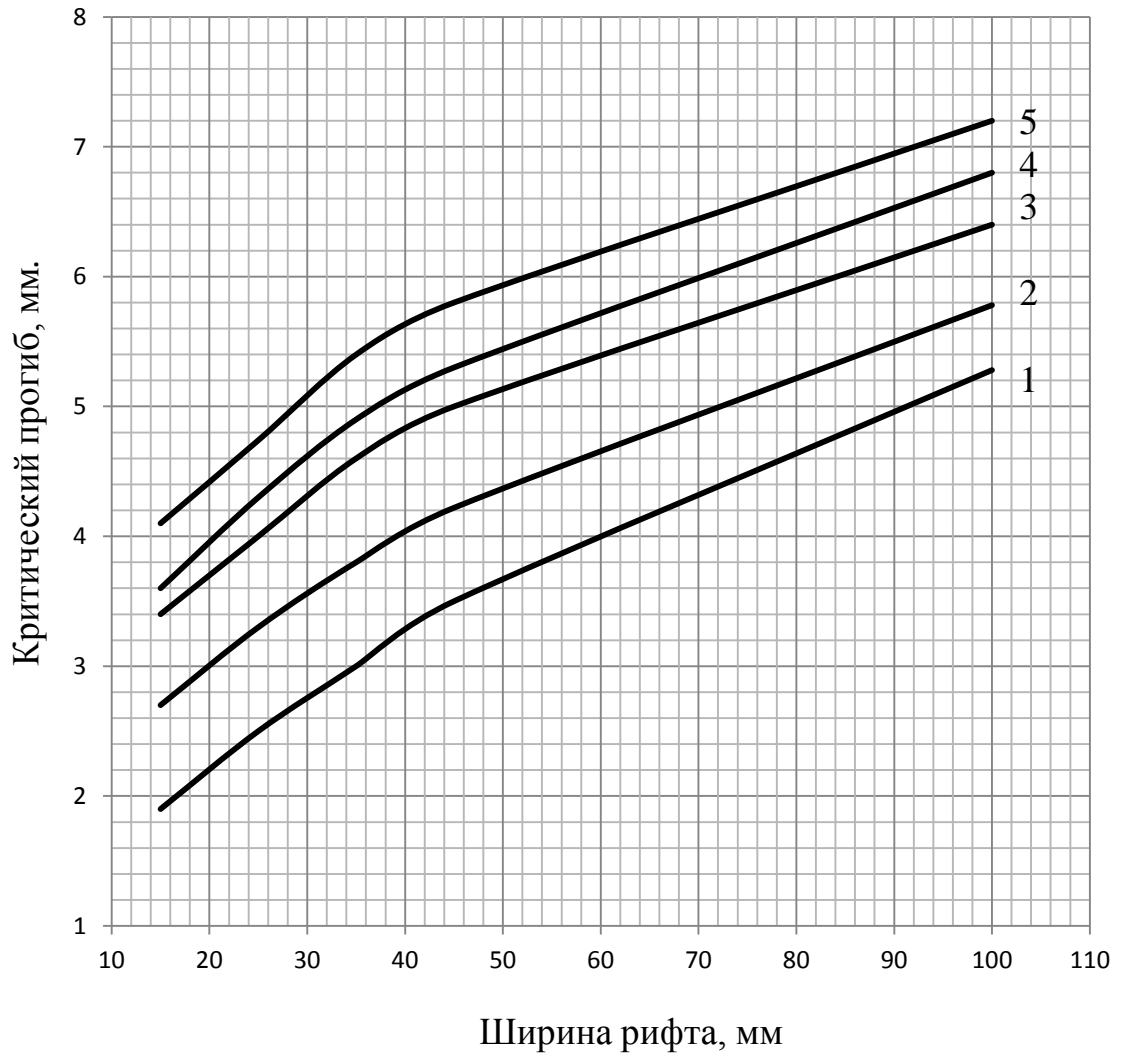
Таблица 3.3 – Таблица параметров прогиба рифта из титанового сплава BT20

b_{ρ} , мм	Толщина листа, S , мм	\bar{b}_{ρ} , $(\bar{b}_{\rho} = \frac{b_{\rho}}{S_0})$.	Параметр критического прогиба		
			$h_{кр}$, мм	$\bar{h}_{кр}$, (2.47)	$q_{кр}$, (2.46)
1	2	3	4	5	6
15	1,0	15,0	1,90	0,253	0,238
	1,5	10,0	2,70	0,360	0,319
	2,0	7,5	3,40	0,453	0,376
	2,5	6,0	3,60	0,480	0,390
	3,0	5,0	4,10	0,547	0,421
20	1,0	20,0	2,20	0,220	0,21
	1,5	13,3	3,00	0,300	0,275
	2,0	10,0	3,70	0,370	0,325
	2,5	8,0	3,96	0,396	0,342
	3,0	6,7	4,40	0,440	0,369
30	1,0	30,0	2,77	0,185	0,179
	1,5	20,0	3,56	0,237	0,225
	2,0	15,0	4,30	0,287	0,265
	2,5	12,0	4,62	0,308	0,281
	3,0	10,0	5,09	0,339	0,304
40	1,0	40,0	3,28	0,164	0,16
	1,5	26,7	4,03	0,202	0,194
	2,0	20,0	4,83	0,242	0,228
	2,5	16,0	5,12	0,256	0,240
	3,0	13,3	5,63	0,281	0,261
50	1,0	50,0	3,68	0,147	0,144
	1,5	33,3	4,38	0,175	0,170
	2,0	25,0	5,13	0,205	0,197
	2,5	20,0	5,44	0,218	0,208
	3,0	16,7	5,95	0,238	0,225

Продолжение таблицы 3.3

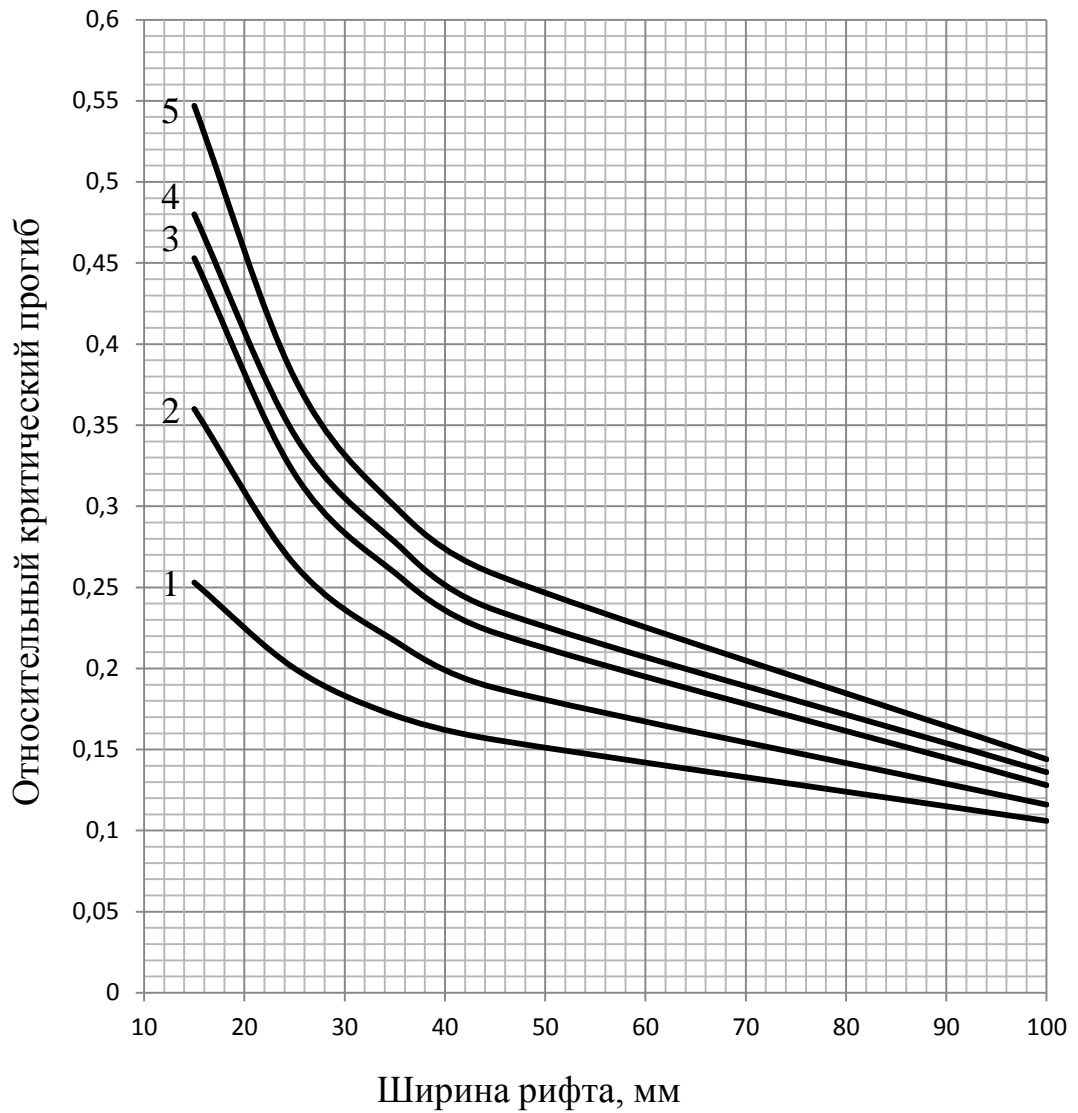
1	2	3	4	5	6
60	1,0	60,0	4,0	0,133	0,131
	1,5	40,0	4,65	0,155	0,151
	2,0	30,0	5,39	0,180	0,174
	2,5	24,0	5,72	0,191	0,184
	3,0	20,0	6,20	0,207	0,198
70	1,0	70,0	4,33	0,114	0,113
	1,5	46,7	4,95	0,133	0,131
	2,0	35,0	5,64	0,154	0,150
	2,5	28,0	6,00	0,163	0,159
	3,0	23,3	6,44	0,177	0,172
80	1,0	80,0	4,63	0,100	0,099
	1,5	53,3	5,22	0,116	0,115
	2,0	40,0	5,90	0,135	0,132
	2,5	32,0	6,25	0,143	0,140
	3,0	26,7	6,70	0,155	0,151
90	1,0	90,0	4,96	0,110	0,109
	1,5	60,0	5,50	0,122	0,120
	2,0	45,0	6,15	0,137	0,134
	2,5	36,0	6,52	0,145	0,142
	3,0	30,0	6,95	0,154	0,151
100	1,0	100	5,28	0,106	0,104
	1,5	66,7	5,78	0,116	0,114
	2,0	50,0	6,40	0,128	0,126
	2,5	40,0	6,80	0,136	0,134
	3,0	33,3	7,20	0,144	0,141

Критический прогиб для сплава ВТ20 для разной ширины рифта и толщины листа представлен на рисунке 3.3, относительный критический прогиб $\bar{h}_{e_{кр}} = \frac{h_{e_{кр}}}{b_e/2}$, представлен на рисунке 3.4.



1 – S₀=1мм; 2 – S₀=1,5мм; 3 – S₀=2мм; 4 – S₀=2,5мм; 5 – S₀=3мм

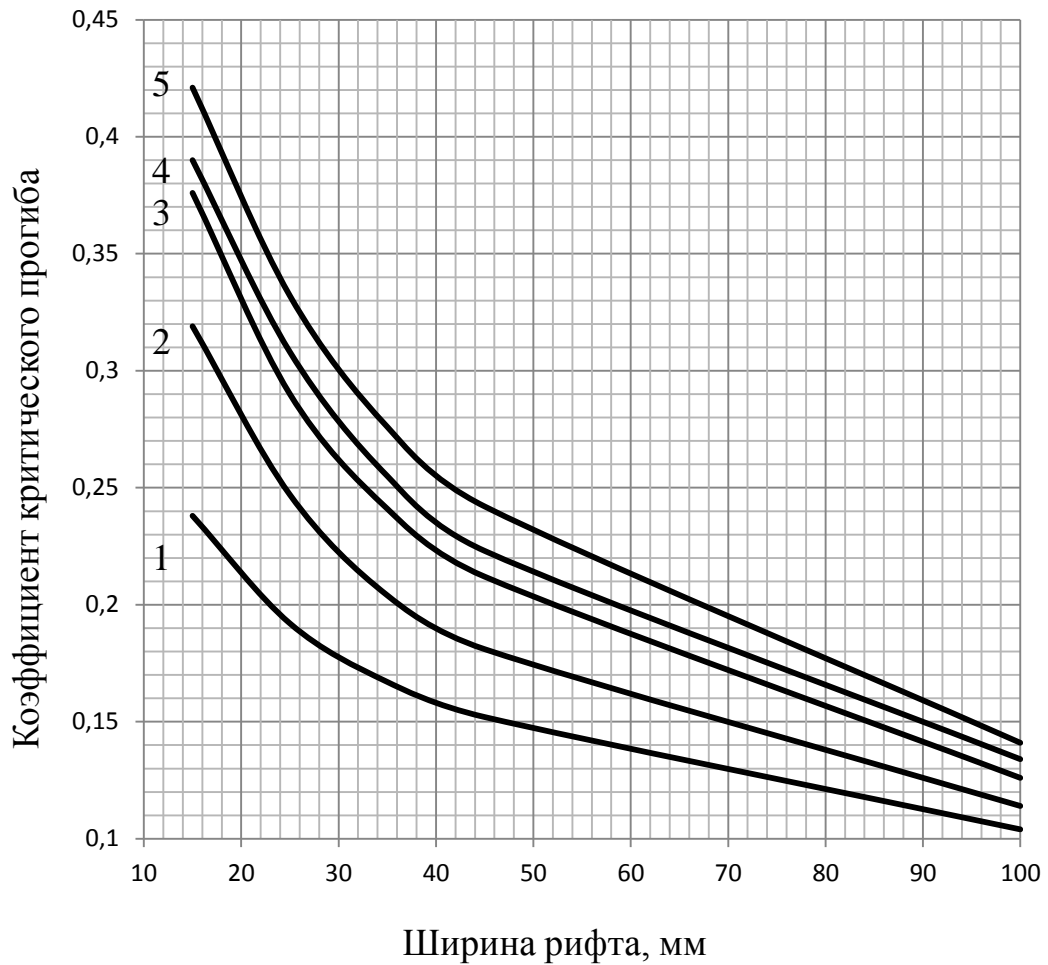
Рисунок 3.3 – Зависимость критического прогиба от ширины рифта для титанового сплава ВТ20 для разных толщин



1 – $S_0=1\text{мм}$; 2 – $S_0=1,5\text{мм}$; 3 – $S_0=2\text{мм}$; 4 – $S_0=2,5\text{мм}$; 5 – $S_0=3\text{мм}$

Рисунок 3.4 – Зависимость относительного прогиба от ширины рифта для титанового сплава BT20 для разных толщин

В результате моделирования определены значения коэффициента критического прогиба рифта из титанового сплава BT20 в зависимости от ширины рифта b_0 и толщины обшивки S_0 , представленные на рисунке 3.5.



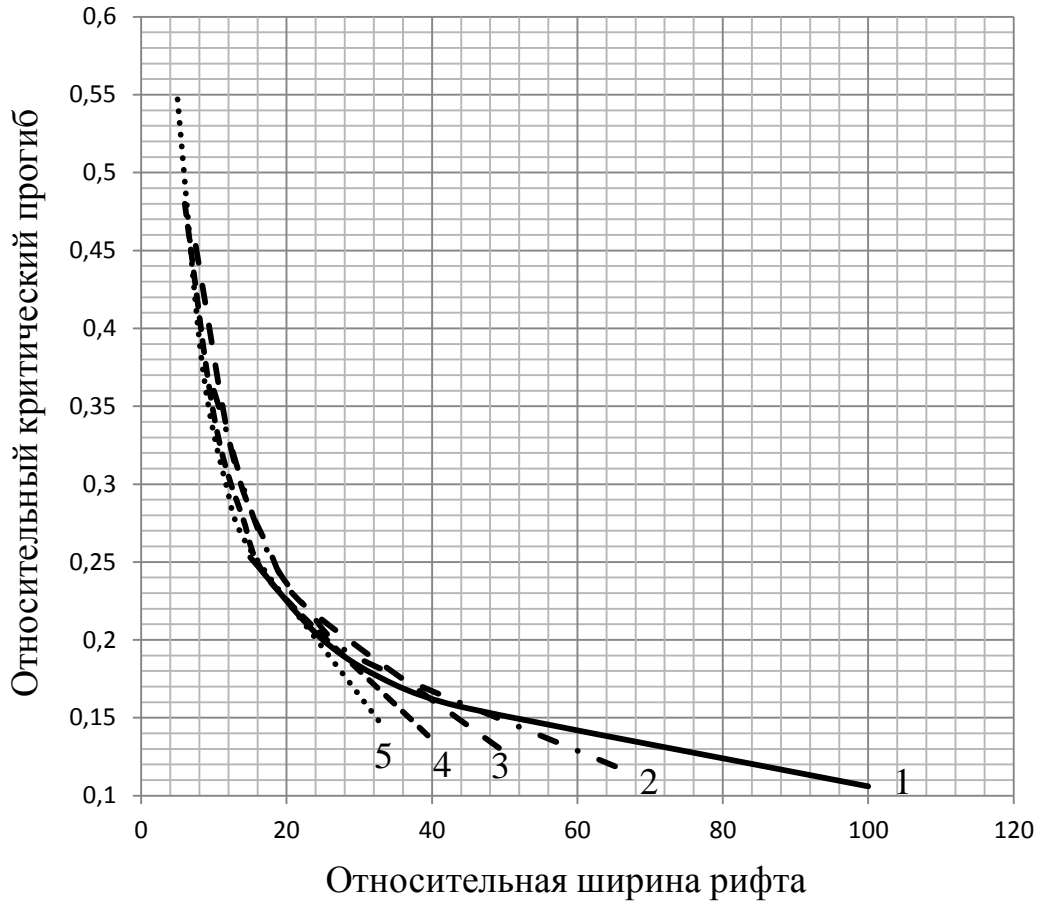
1 – $S_0=1$ мм; 2 – $S_0=1,5$ мм; 3 – $S_0=2$ мм; 4 – $S_0=2,5$ мм; 5 – $S_0=3$ мм

Рисунок 3.5 – Изменение коэффициента критического прогиба от ширины рифта для титанового сплава BT20 для разных толщин

Для построения обобщённых кривых зависимостей относительного прогиба и коэффициента критического прогиба воспользуемся безразмерной величиной относительной ширины рифта \bar{b}_q , которая определяется по формуле:

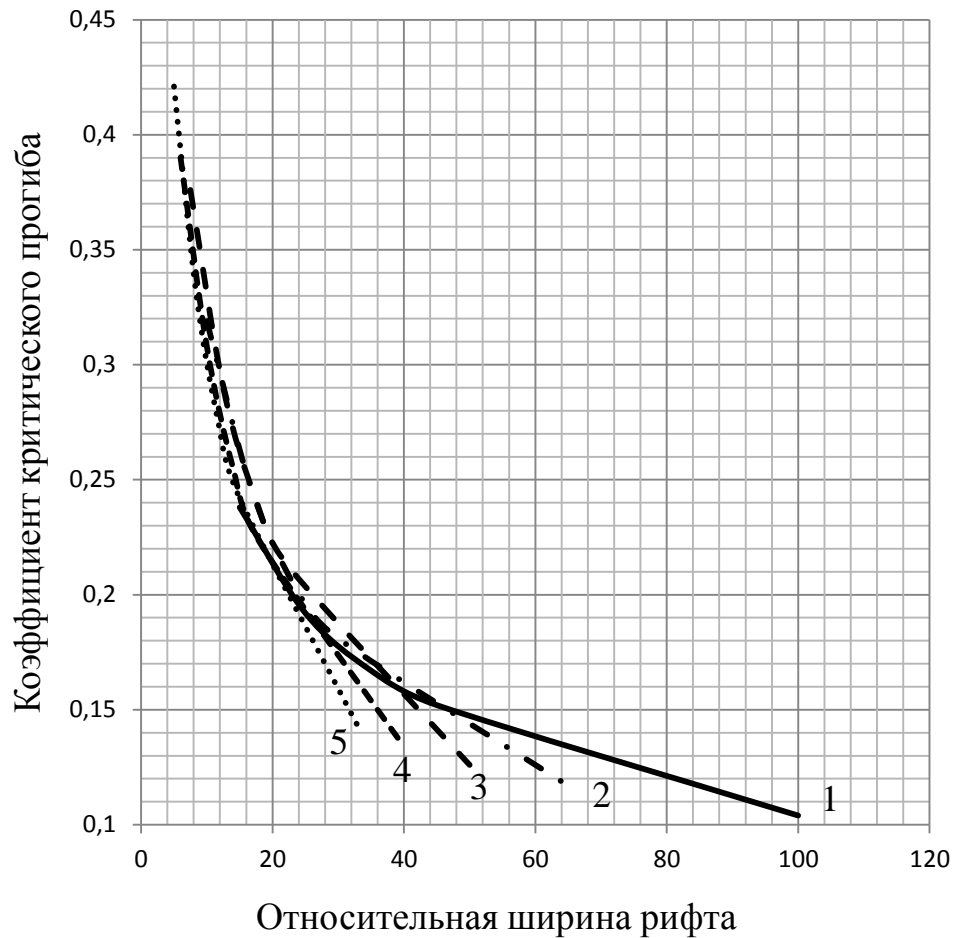
$$\bar{b}_q = \frac{b_q}{S_0}. \quad (3.1)$$

В зависимости от относительной ширины рифта \bar{b}_q построены графики изменения относительного прогиба и коэффициента критического прогиба (рисунок 3.6, рисунок 3.7).



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 3.6 – Изменение относительного прогиба от относительной ширины рифта для титанового сплава BT20



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 3.7 – Зависимость коэффициента критического прогиба от относительной ширины рифта для титанового сплава BT20

Результаты определения коэффициента критической высоты необходимы для определения рекомендуемого диапазона соотношения толщин обшивки и заполнителя $\frac{S_0}{S_3}$ трёхслойных панелей по формуле (2.45).

Полученные графики на рисунках 3.3-3.7 применимы для любого вида трёхслойных панелей как плоскопараллельных, так и переменной высоты с любым расположением гофров.

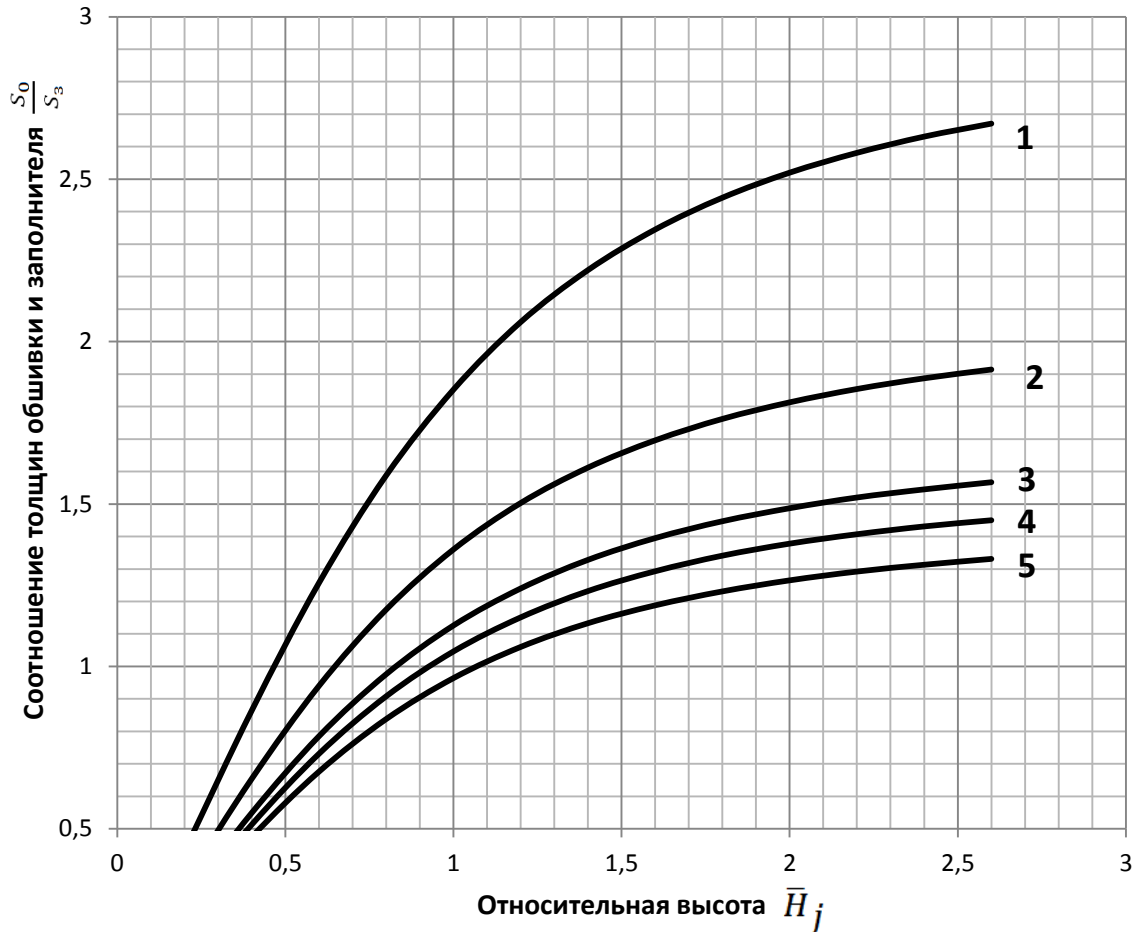
3.1.3 Определение соотношения толщин для обеспечения формовки без образования утяжин

Для качественной формовки многослойных панелей важен правильный выбор соотношения толщин обшивки и заполнителя. Соотношение толщин обшивки и заполнителя, обеспечивающее формовку панели без утяжин, определяется по коэффициенту критического прогиба $q_{кр}$.

Для клиновидной панели из титанового сплава ВТ20 с толщиной обшивки $S_0 = 2$ мм, с шагом гофра $\bar{b}_g = 25$ мм критический прогиб обшивки по графику на рисунке 3.3 составляет 4,0 мм, а значение коэффициента критического прогиба по графику на рисунке 3.5 равен $q_{кр} = 0,29$. Подставив значение коэффициента критического прогиба в формулу (2.45) получим рекомендуемый диапазон соотношения толщин обшивки и заполнителя:

$$\frac{S_0}{S_{з0}} > \frac{n \cdot b_g \cdot \left(\frac{\bar{H}_j}{1 + \bar{H}_j^2} \right) \cdot e^{\frac{\ln(1 + \bar{H}_j^2)}{2}}}{4 \cdot 0,29 \cdot B - 2 \left(b_g \cdot \left(\frac{\bar{H}_j}{1 + \bar{H}_j^2} \right) \cdot e^{\frac{\ln(1 + \bar{H}_j^2)}{2}} \right)}$$

На рисунке 3.8 построены кривые для определения соотношения толщин трехслойной панели из титанового сплава ВТ20 с гофрированным заполнителем шириной $B = 220$ мм, числом ребер гофров $n = 14$, шириной гофра заполнителя 25 мм и исходной толщиной обшивки равной 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 мм.



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 3.8 – Диапазон выбора соотношения толщин в зависимости от относительной высоты панели из титанового сплава BT20

Из графика следует, что выше линии находится рекомендуемый диапазон выбора соотношения толщин $\frac{S_0}{S_{30}}$, при котором произойдет формовка трехслойной панели без образования дефектов.

3.1.4 Оценка рекомендуемого диапазона значений соотношения толщин

Проверка рассчитанного диапазона соотношения толщин проводилась методом моделирования процесса формовки трёхслойных панелей с различными конструктивно-геометрическими параметрами в ПК «MSC Marc».

Для подтверждения условий возникновения неустраняемых дефектов и проверки достоверности зависимостей было проведено моделирование формообразования трёхслойных панелей из титанового сплава ВТ20 с различными значениями соотношения толщин заполнителя и относительных высот. Для моделирования использована зависимость соотношения толщин и относительных высот для исходной толщины обшивки 2,0 мм, представленная на рисунке 3.8. Моделирование выполнено по соотношениям, соответствующим точкам в области рекомендуемой кривой, представленным на рисунке 3.9. В скобках указана величина толщины заполнителя для каждого значения соотношения толщин.

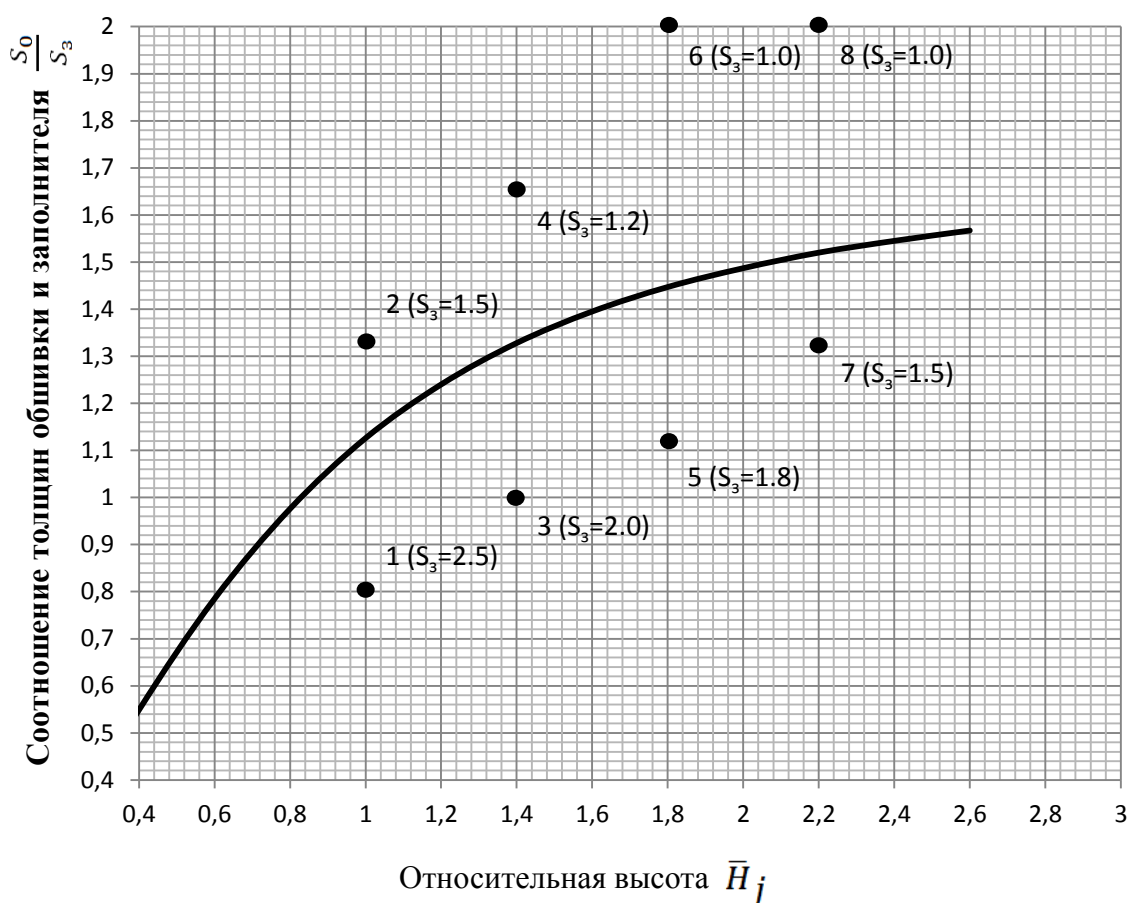


Рисунок 3.9 – Точки с различными толщинами заполнителя и толщиной обшивки панели $S_0 = 2$ мм для проверки условий возникновения дефектов

На рисунке 3.10 показаны результаты моделирования ПТФ трёхслойной плоской панели с параметрами по точке 1 (относительная высота панели $\bar{H}_n = 1,0$, соотношение толщин $\frac{S_0}{S_3} = 0,8$). Точка 1 расположена ниже кривой в зоне неблагоприятной для формовки панели.

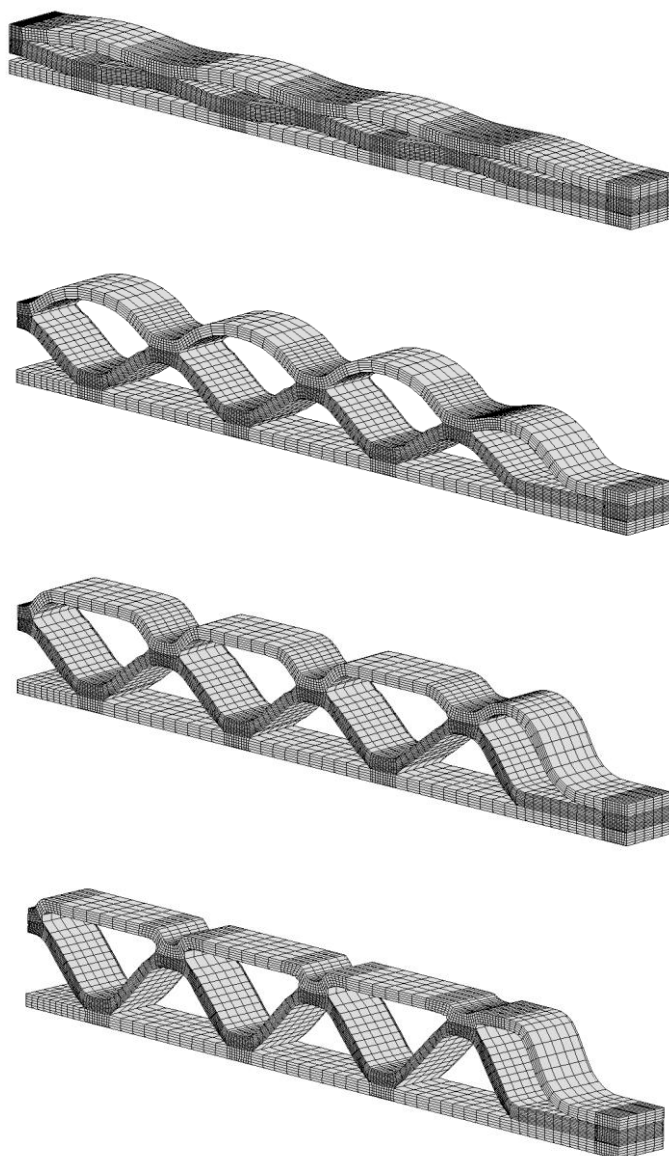


Рисунок 3.10 – Результат моделирования ПТФ трёхслойной плоской панели с параметрами $\bar{H}_n = 1,0$; $\frac{S_0}{S_3} = 0,8$; $S_0 = 2$ мм; $S_3 = 2,5$ мм.

В процессе моделирования прогиб критической высоты верхней обшивки привёл к образованию утяжин. Величина утяжины $h_{ут}$ измеряется в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.11.

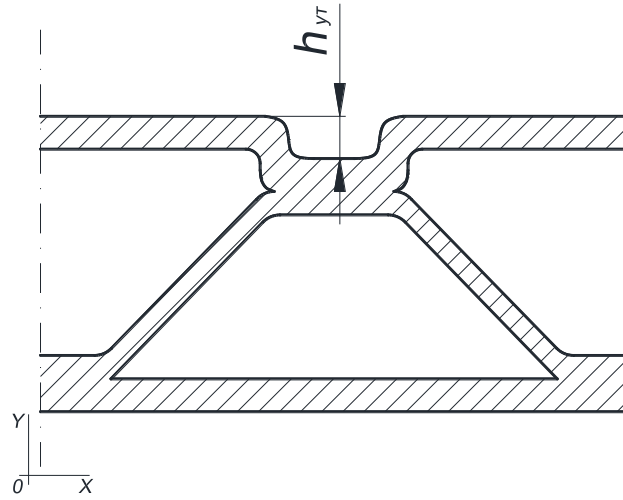


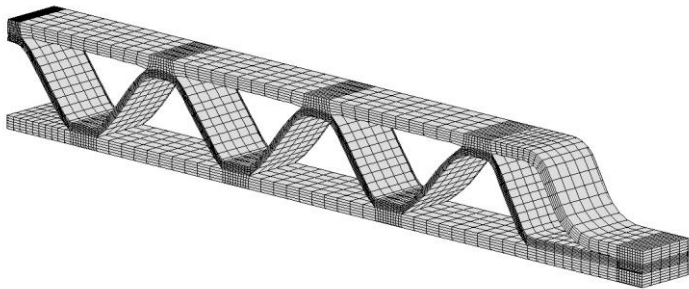
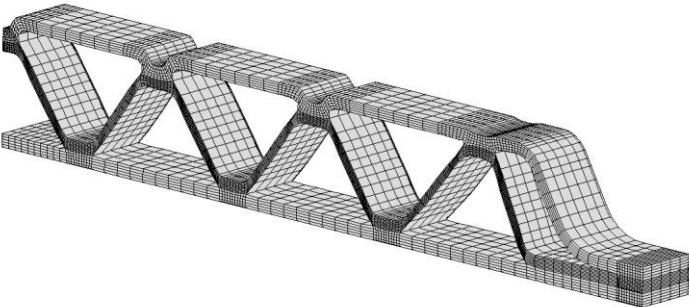
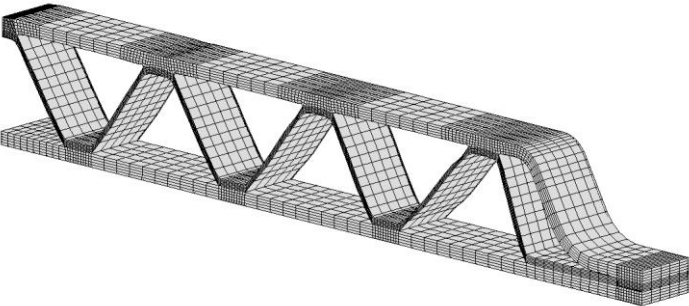
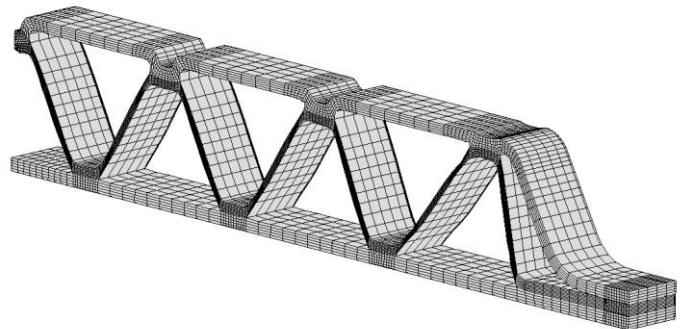
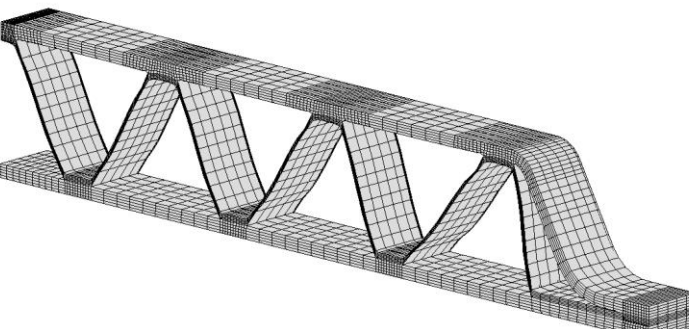
Рисунок 3.11 – Измерение величины утяжины

Результаты моделирования трёхслойных панелей с различными значениями соотношения толщин и относительных высот для выделенных точек на рисунке 3.9 сведены в таблицу 3.4.

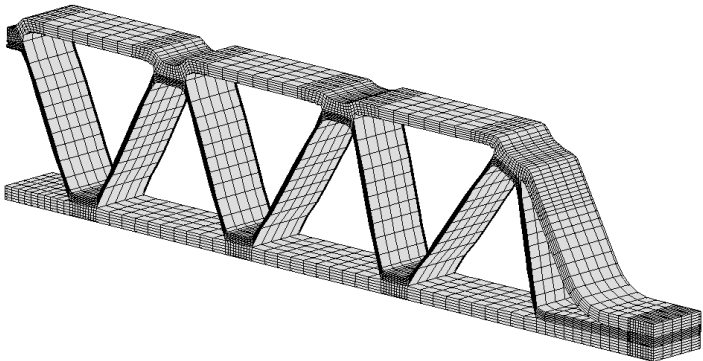
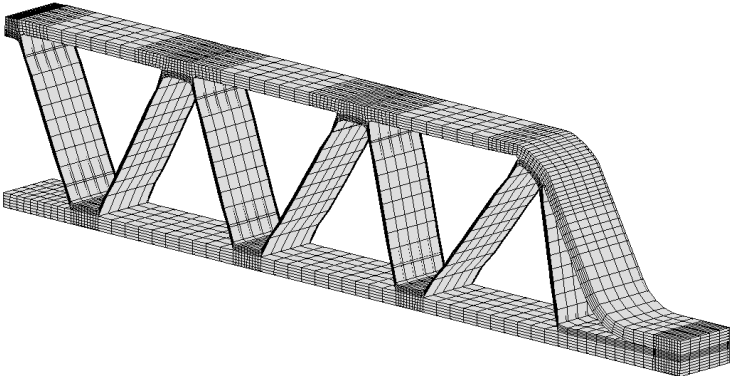
Таблица 3.4 – Моделирование ПТФ трёхслойных плоскопараллельных панелей из титанового сплава BT20

№ точ ки	Параметры панели		Результат моделирования ПТФ панели	$h_{ут}$, мм
	$\bar{H}_п$	$\frac{S_0}{S_3}$		
1	2	3	4	5
1	1,0	0,8		2,0

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4	5
2	1,0	1,3		0
3	1,4	1,0		2,18
4	1,4	1,65		0
5	1,8	1,11		2,5
6	1,8	2,0		0

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4	5
7	2,2	1,3		1,6
8	2,2	2,0		0

Результаты моделирования подтвердили выводы, полученные при построении кривых. В точках 1, 3, 5, 7, расположенных ниже кривой, сформировались утяжины. В точках 2, 4, 6, 8, расположенных выше кривой, утяжины не возникли. Это подтверждает достоверность кривой зависимости соотношения толщин обшивки и заполнителя от относительной высоты панели для плоских панелей.

Для проверки достоверности графика на рисунке 3.9 применительно к клиновидным панелям, рассмотрена формовка клиновидных панелей с различными параметрами соотношений толщин и относительных высот.

Формовка клиновидной панели постоянного шага ребер гофров с относительной высотой начального ребра $\bar{H}_1 = 1.8$ и соотношением толщин $\frac{s_0}{s_3} = 2$ по точке 6 показана на рисунке 3.12.

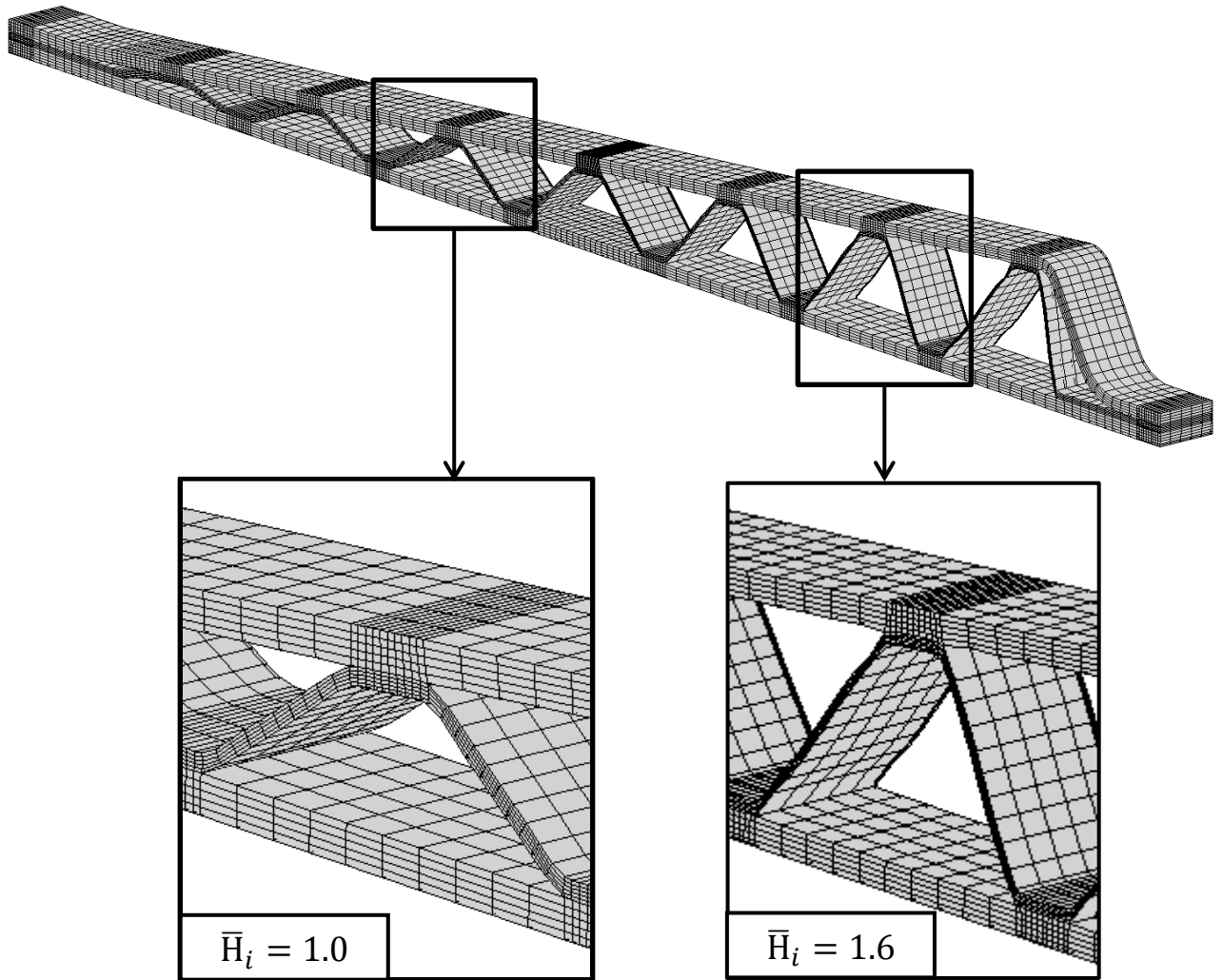



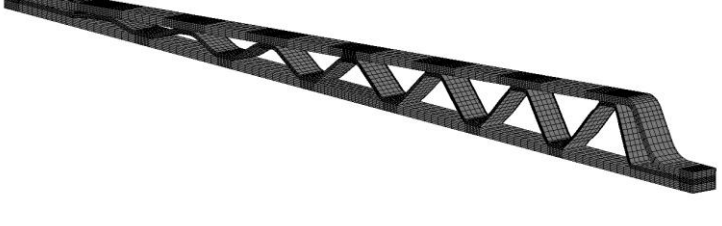
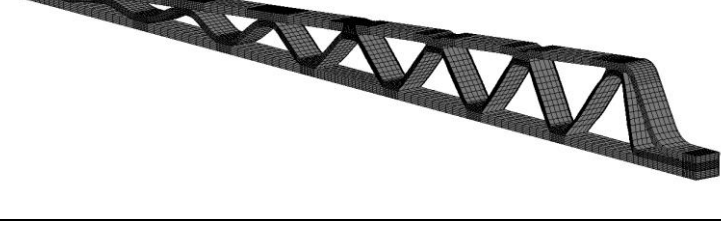


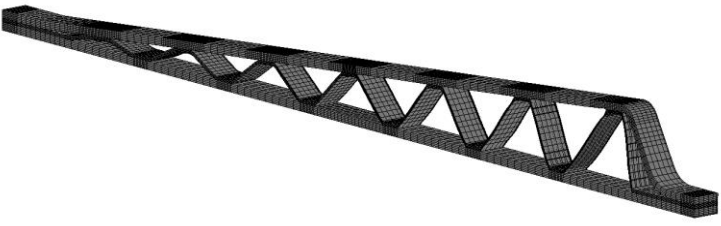
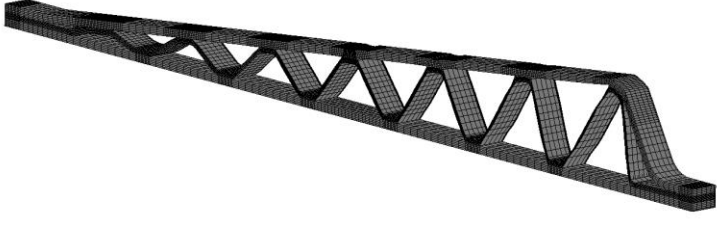
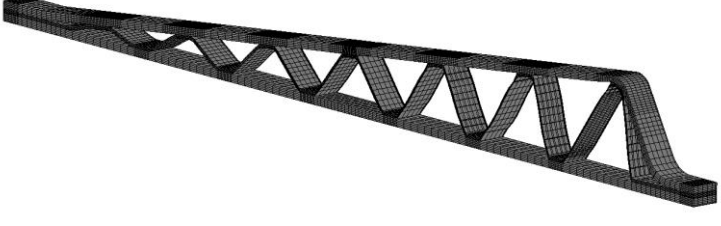
Рисунок 3.12 – ПТФ клиновидной многослойной панели постоянного шага ребер с $\bar{N}_1 = 1.8$ и $\frac{S_0}{S_3} = 2$

Результаты моделирования трёхслойных панелей с различными значениями соотношения толщин и относительных высот сведены в таблице 3.5. В таблице представлены максимальные по величине утяжины $h_{утmax}$, возникающие при формовке клиновидных панелей с параметрами, соответствующими тем же точкам на рисунке 3.9.

Таблица 3.5 – Моделирование ПТФ трёхслойных клиновидных панелей из титанового сплава ВТ20

№ точ ки	Параметры панели		Результат моделирования ПТФ панели	$h_{утmax}$, мм
	$\bar{H}_{пmax}$	$\frac{S_0}{S_3}$		
1	2	3	4	5
1	1,0	0,8		0,99
2	1,0	1,3		0
3	1,4	1,0		0,87
4	1,4	1,65		0
5	1,8	1,11		1,07

Продолжение таблицы 3.5

1	2	3	4	5
6	1,8	2,0		0
7	2,2	1,3		0,33
8	2,2	2,0		0

По результатам моделирования видно, что так же как и для плоскопараллельных панелей, утяжин в процессе формовки клиновидной трёхслойной панели с рекомендуемыми параметрами заполнителя в точках 2, 4, 6, 8 не возникает, а в точках 1, 3, 5, 7, в nereкомендуемой зоне выбора параметров утяжины возникают. Следовательно, кривая зависимости на рисунке 3.9, а также на рисунке 3.8, может быть применена для любых трёхслойных панелей как плоскопараллельных, так и клиновидных.

3.2 Натурные эксперименты

3.2.1 Оборудование для проведения экспериментов

Работы по определению параметров сверхпластичности и изготовлению многослойных панелей проводились на прессе сверхпластичного формования и диффузионной сварки «FSP60T» (рисунок 3.13), французской фирмы «АСВ».



Рисунок 3.13 – Пресс Loire FSP 60T

Характеристики пресса «FSP60T»:

- диаметр рабочей зоны 580 мм;
- развиваемое усилие – от 60 кН до 600 кН;
- контролируемый нагрев оснастки в диапазоне температур до 1000°C;
- количество газопроводов – 3;
- диапазон регулирования избыточного давления по газовым линиям 0-4 МПа (0-40 атм.) (газовая система обеспечивает возможность автоматизированной подачи и контроля избыточного давления газа в соответствии с расчетной зависимостью изменения давления формования по времени по каждому газопроводу).

Пресс «FSP60T» позволяет реализовывать технологические процессы:

- диффузионную сварку двух и более титановых листов – проводится путем применения давления на внешние стороны листового пакета в течение заданного периода времени при температуре от 890 до 950°C для различных титановых сплавов;

– сверхпластическое формование титановых деталей – достигается путем герметизации оснастки с заготовкой, после чего применяется давление газа по замкнутому циклу и формование детали при температурах до 950°C с определенными параметрами деформации.

Во время процесса ПТФ/ДС пресс удерживает оснастку в герметичном состоянии регулируемым усилием, зависящим от давления газа в процессе формовки конструкции. Нагрев оснастки до необходимой температуры производится предварительно до цикла замыкания оснастки и герметизации заготовки. В прессе достигаются стабильные изотермические условия нагрева оснастки.

Для нанесения рисунка антисварочного покрытия используется машина «DEBUIТ» (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 – Машина «DEBUIТ» для нанесения антисварочного покрытия

Антисварочное покрытие наносится по трафарету на поверхность заготовок. Машина с трафаретом для изготовления многослойных панелей представлена на рисунке 3.15.

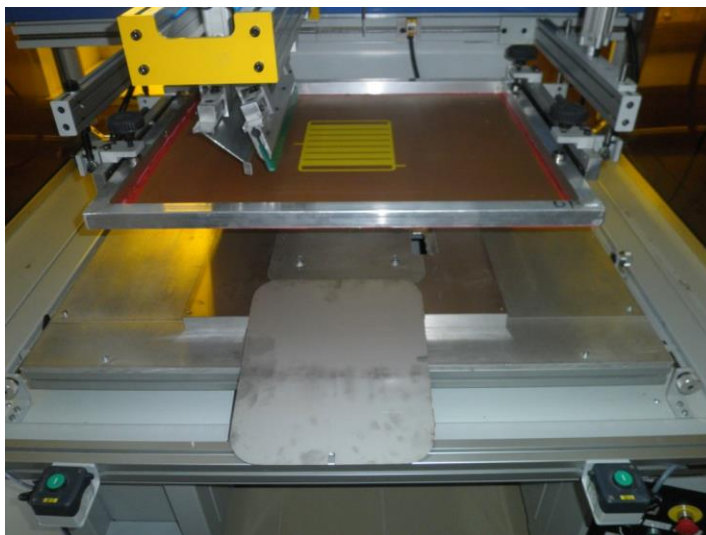


Рисунок 3.15 – Трафарет в машине для нанесения антисварочного покрытия

От качества нанесения антисварочного покрытия, его состава и свойств во многом зависит качество получаемых панелей. Специфические условия работы предъявляют к материалам антисварочного покрытия, следующие основные требования:

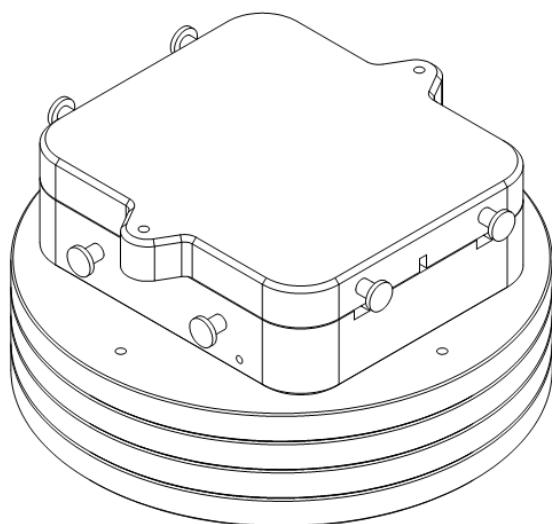
- полностью предотвращать сваривание;
- иметь хорошую адгезию к поверхности заготовок;
- сохранять свои антисварочные свойства при температурах порядка 1000°С в течение всего времени сварки;
- не вступать во взаимодействие с материалом заготовок в процессе нагрева до 1000°С, выдержки при этой температуре и высоком давлении (до 3 МПа) в условиях вакуума или инертной среды;
- не ухудшать прочностные характеристики материала заготовок после проведения процесса ПТФ/ДС и качества диффузионной сварки на непокрытых антисварочным покрытием участках заготовок;
- не иметь сильного газовыделения при нагреве до температур порядка 1000°С;
- материалы должны быть дешёвы в приготовлении, технология нанесения и удаления их на заготовки должна быть простой.

В качестве антисварочного покрытия используется нитрид бора и оксид иттрия. Нитридом бора покрывается пакет заготовок с наружной стороны, для недопущения сваривания пакета с оснасткой. Оксид иттрия используется для нанесения рисунка антисварочного покрытия внутри пакета листов по трафарету.

3.2.2 Оснащение для проведения экспериментов

Для опытных работ использован блок, предназначенный для изготовления модельных изделий из трудно деформируемых сплавов, в том числе и титановых, на основе технологий сверхпластичного формования и совмещенных процессов сверхпластичного формования и диффузионной сварки.

Блок (рисунок 3.16) может применяться для изготовления сложных по форме деталей и многослойных конструкций.



а)



б)

Рисунок 3.16 – Общий вид блока с матрицей

Блок выполнен из двух частей (рисунок 3.17) с горизонтальным разъемом. К верхней и нижней частям блока подведена газовая система, состоящая из трёх линий. В блоке также имеется 5 отверстий для термопар.

Блок обеспечен системой позиционирования верхней и нижней частей относительно друг друга с помощью 3 штифтов.

Для подачи газа в верхней и нижней части блока выполнены отверстия для газовых линий. Отдельно в нижней части блока расположены ещё две газовые линии, предназначенные для формовки многослойных конструкций, чтобы осуществлять подачу давления внутрь пакета многослойной заготовки.

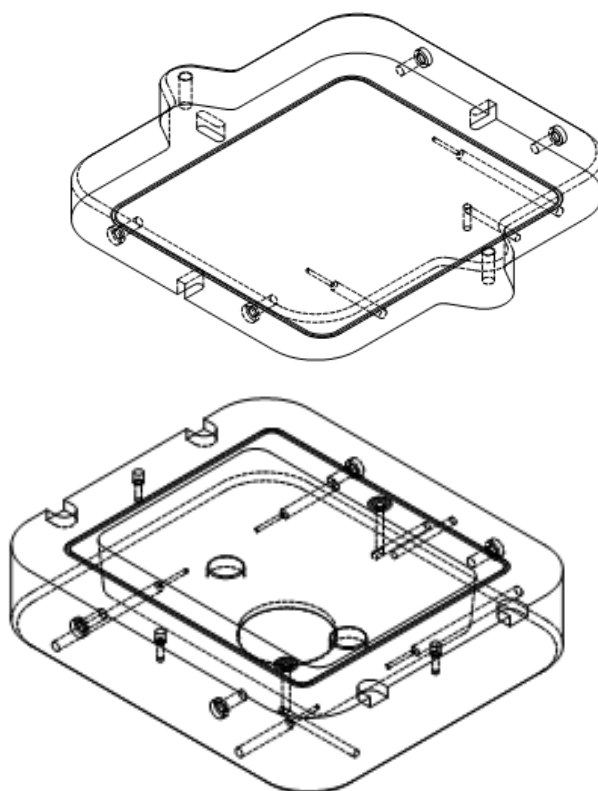


Рисунок 3.17 – Части блока

В блоке предусмотрена возможность установки сменных матриц для получения деталей заданных форм. Для формования многослойных конструкций из титановых сплавов по технологии сверхпластичного формования и диффузионной сварки из трех листовых заготовок использована матрица, устанавливаемая в нижнюю часть оснастки, представленная на рисунок 3.18.

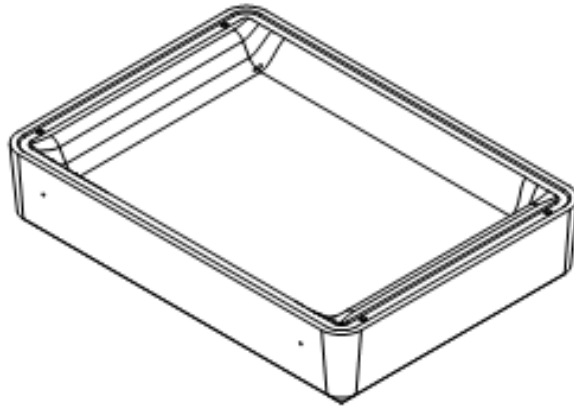


Рисунок 3.18 – Матрица для формовки многослойных конструкций

С помощью дополнительных вставок можно получать оснастку для изготовления различных конструкций, в том числе и клиновидных панелей.

Для формообразования клиновидных трёхслойных панелей были использованы вставки (рисунок 3.19).



а

б

Рисунок 3.19 – Вставки для формовки клиновидных трёхслойных панелей

Вставки (рисунок 3.19а) позволили изготавливать клиновидные панели с продольным и поперечным гофровым набором. На рисунке 3.19б показана матрица с вложенной вставкой для изготовления клиновидной трёхслойной панели.

3.2.3 Процесс ПТФ/ДС многослойных титановых панелей

Процесс ПТФ/ДС многослойных конструкций состоит из ряда этапов:

- 1) раскрой листов обшивок и заполнителя;
- 2) подготовка поверхности заготовок с последующей промывкой ацетоном непосредственно перед сборкой пакета. Эта операция необходима для того, чтобы удалить с поверхности заготовок любые загрязнения, которые могут помешать диффузии и образованию качественного сварного соединения;
- 3) сверление отверстий в листе заполнителя для дополнительного сообщения полостей между обшивками и заполнителем;
- 4) нанесение по трафарету на лист заполнителя в заданных местах антисварочного покрытия. От качества нанесения антисварочного покрытия, от его состава и свойств во многом зависит качество получаемых конструкций;
- 5) подготовка системы подачи давления газа внутрь пакета;
- 6) сборка пакета из листов обшивок и заполнителя и их соединение на прихваточные точки;
- 7) установка пакета в оснастку и загрузка в установку ПТФ/ДС;
- 8) нагрев оснастки с пакетом заготовок до заданной температуры и поддержание её в течение всего процесса;
- 9) сжатие пакета верхней крышкой блока для герметизации полости между листами заготовок и рабочей полостью оснастки;
- 10) создание в рабочей камере установки разрежения. Разрежение необходимо для удаления газа из полостей между листами пакета, который может препятствовать диффузионной сварке, а так же для дегазации поверхности материала заготовок;
- 11) выполнение диффузионной сварки листов на участках, не покрытых антисварочным покрытием, путём создания в полости под заготовками давления аргона необходимой величины и выдержки при этом давлении в течение заданного времени;
- 12) сброс давления аргона из полости под заготовками;

13) подача аргона между обшивками и заполнителем с регулированием давления по ходу процесса в соответствии с расчётными значениями $p = f(\tau)$ для раскрытия и формовки панели;

14) сброс давления аргона по окончании формовки, охлаждение оснастки и извлечение панели;

15) контроль качества изготовления многослойной конструкции.

3.2.4 Проверка разработанных математических моделей. Апробация методики расчета «давление – время»

Для проверки расчётных закономерностей, описывающих процесс формообразования многослойных клиновидных панелей, проведена серия экспериментов. Эксперименты проводились с использованием универсального блока с матрицей, показанной на рисунке 3.18 и дополнительными вставками (рисунок 3.19а).

Проведение экспериментальной формовки для изготовления образцов клиновидных панелей потребовало выполнения следующих действий:

1) определение рекомендуемой толщины заполнителя клиновидных панелей по расчётной зависимости (2.45) для недопущения возникновения дефектов (в зависимости от относительных высот панелей);

2) расчёт кривых нагружения $p(\tau)$ по методике, разработанной в главе 2, для формовки многослойных клиновидных конструкций с заданными конструктивно-геометрическими параметрами и размерами. Параметры материала ВТ20 для расчёта кривой нагружения принимались из таблицы 3.1. Скорость деформации для соблюдения режима сверхпластического деформирования принималась постоянной;

3) осуществление процесса ПТФ/ДС трехслойных клиновидных панелей по рассчитанным кривым нагружения $p(\tau)$;

4) выполнение измерений толщины заполнителя в контрольных зонах;

5) сравнение расчётных значений характерных параметров процесса с полученными в результате экспериментов;

б) установление степени работоспособности методики для определения параметров формовки многослойных клиновидных панелей.

Вывод о работоспособности методики определения параметров нагружения при формообразовании клиновидных многослойных конструкций можно сделать исходя из сравнения расчётных и экспериментальных данных параметров и распределения толщин.

3.2.5 Определение параметров клиновидных трёхслойных панелей

Для сравнения расчётных и экспериментальных данных рассмотрена трехслойная клиновидная панель из титанового сплава BT20 с гофровым наполнителем шириной $B=220$ мм, с числом ребер гофров $n=14$, исходной толщиной обшивок $S_0 = 2$ мм, с максимальной высотой наполнителя $H_1 = 18$ мм, постоянным шагом ребра гофра $a_j = 10$ мм. Максимальная относительная высота панели составляет $\bar{H}_1 = 1,8$. Для данной относительной высоты рекомендуемое соотношение толщин обшивки и наполнителя на рисунке 3.9 составляет $\frac{S_0}{S_3} > 1,45$. Принимается значение соотношения толщин $\frac{S_0}{S_3} = 2$, находящееся в рекомендуемой зоне соотношения толщин и соответствует точке б. Тогда, при толщине обшивок $S_0 = 2$ мм, рекомендуемая толщина наполнителя составит $S_3 = 1$ мм.

Общий вид трехслойных клиновидных панелей, с принятыми выше параметрами продольного и поперечного гофрового набора с постоянным шагом гофров, представлен на рисунке 3.20 и рисунке 3.21.

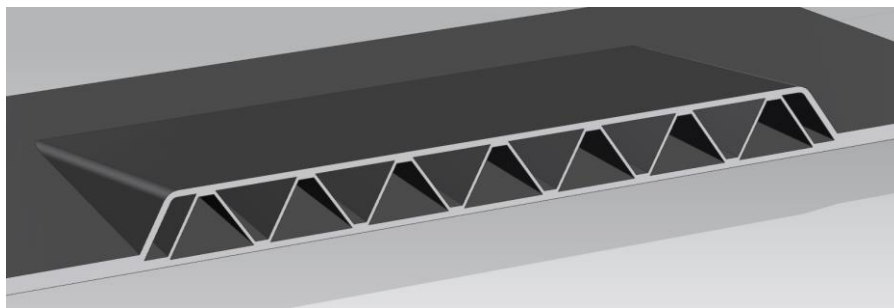


Рисунок 3.20 - Разрез клиновидной трехслойной панели с продольным гофровым набором

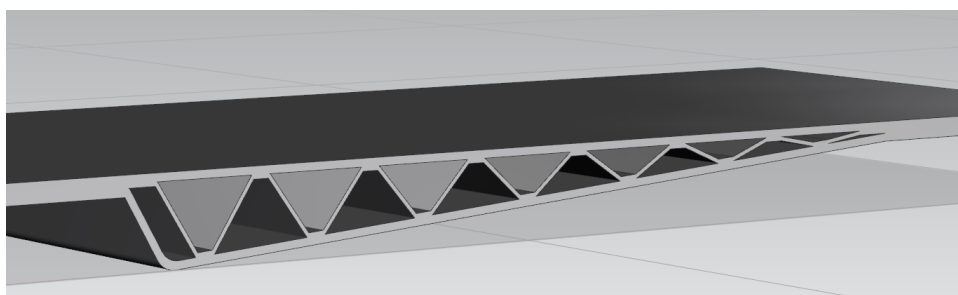


Рисунок 3.21 – Разрез клиновидной трехслойной панели с поперечным гофровым набором

Для изготовления клиновидных трёхслойных панелей с заданными параметрами необходимо рассчитать график изменения требуемого давления по времени формовки.

3.2.6 Определение технологических параметров формовки клиновидных трёхслойных панелей

Для клиновидных трёхслойных панелей с продольным и поперечным гофровым набором постоянного шага с параметрами, принятыми в пункте 3.2.5, с соотношением толщин обшивки и заполнителя $\frac{S_0}{S_3} = 2$, по зависимостям в главе 2 определены технологические параметры формовки. Стадия свободной

формовки заполнителя рассчитана с помощью программы, приведённой в Приложении 1.

График для формовки трехслойной клиновидной панели с продольным гофровым набором постоянного шага представлен на рисунке 3.22.

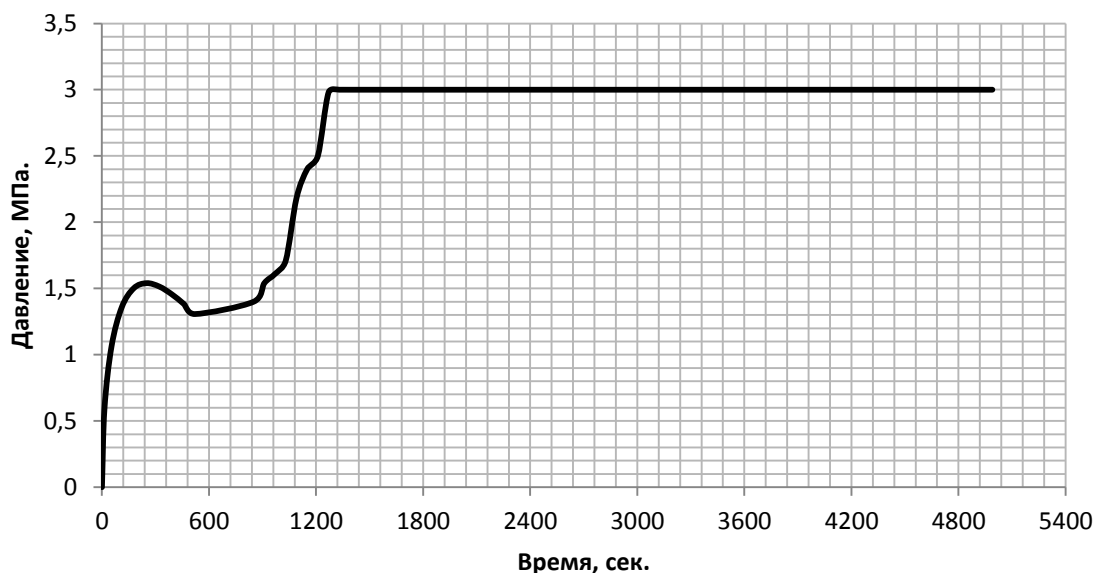


Рисунок 3.22 - График изменения давления формовки клиновидной панели с продольным гофровым набором из титанового сплава ВТ20

Полученный образец клиновидной панели с продольным гофровым набором постоянного шага, отформованный по графику зависимости на рисунке 3.22, представлен на рисунке 3.23.

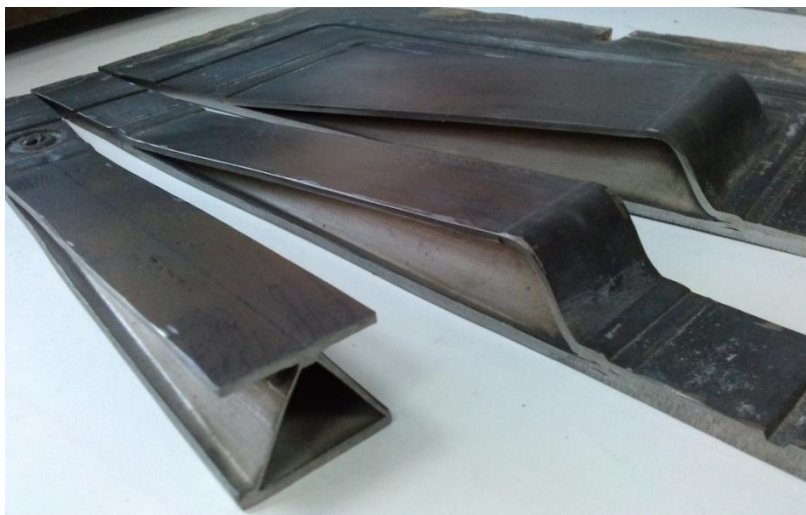


Рисунок 3.23 – Клиновидная панель с продольным гофром из титанового сплава BT20

График для формовки трехслойной клиновидной панели с поперечным гофровым набором постоянного шага представлен на рисунке 3.24.

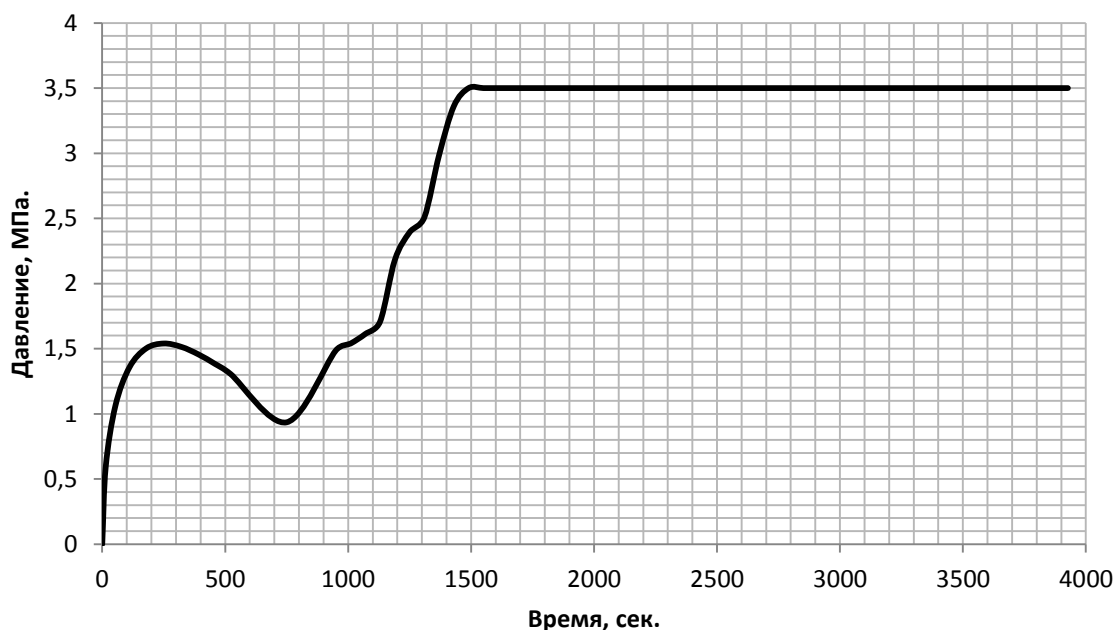


Рисунок 3.24 - График изменения давления для формовки клиновидной панели с поперечным гофровым набором постоянного шага

Полученный образец клиновидной панели, отформованный по графику зависимости на рисунке 3.24, представлен на рисунке 3.25.



Рисунок 3.25 – Клиновидная панель с поперечным гофром из титанового сплава BT20

При формовке панелей производилась калибровка с выдержкой в 30-60 минут при максимальном давлении, предусмотренная графиками. В результате формовки получены клиновидные панели с продольным и поперечным гофровым набором без образования дефектов и недоформовки.

Таким образом, эксперимент натурального изготовления клиновидных панелей подтверждает работоспособность зависимости конструктивно-геометрических параметров гофров, представленной на рисунке 3.8 и рисунке 3.9, как для продольного, так и поперечного расположения гофров, т.е. не зависит от расположения гофров в панели.

3.2.7 Распределение толщины заполнителя по профилю и сечению панелей

Для составления схемы размещения контрольных точек для измерения толщины заполнителя после формования использованы полученные образцы, представленные на рисунке 3.26 и рисунке 3.29.

Образец сечения заполнителя клиновидной трёхслойной панели с продольным гофровым набором представлен на рисунке 3.26.

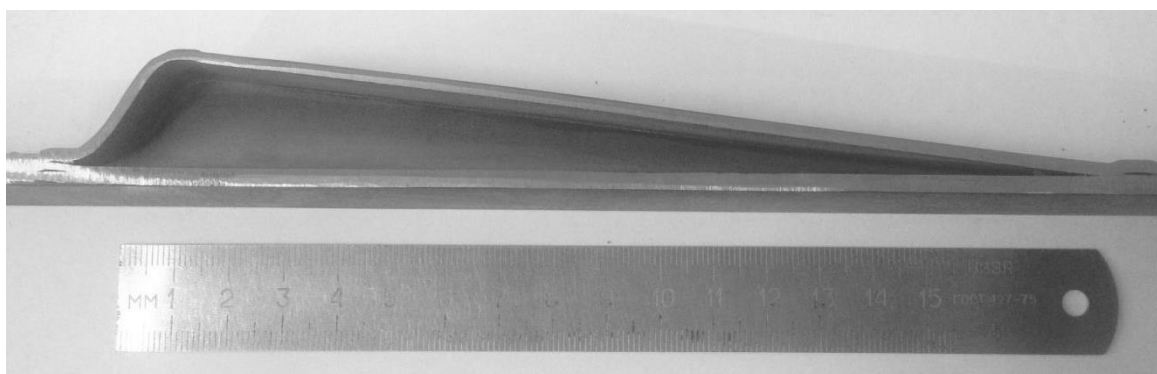


Рисунок 3.26 – Образец сечения заполнителя клиновидной панели с продольным гофром

Из-за влияния концевой зоны на деформирование заполнителя, описанного в первой главе, не рассматривается сечение и ребро гофра панелей в концевой зоне, так как характер деформирования в этих местах отличен от линейного растяжения.

Нумерация сечений продольного ребра заполнителя многослойной клиновидной панели произведена в регулярной зоне панели, в порядке уменьшения высоты и представлена на рисунке 3.27. Нумерация сечений принята с шагом 10 мм.

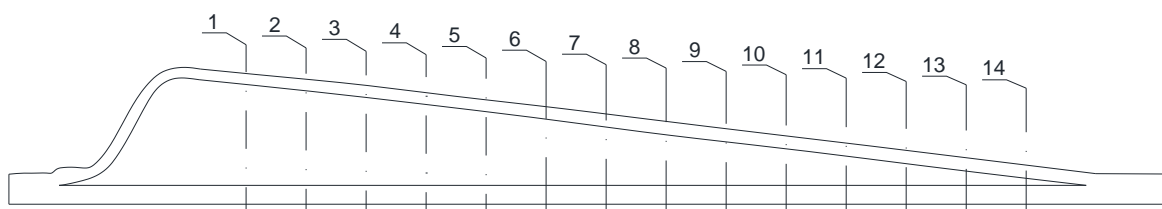


Рисунок 3.27 - Нумерация сечений ребра заполнителя многослойной клиновидной панели с продольным гофровым набором

Положение контрольных точек по сечению обозначено на рисунке 3.28. В контрольных точках по сечениям ребра произведены замеры толщины заполнителя S_3 на образце, представленном на рисунке 3.26.

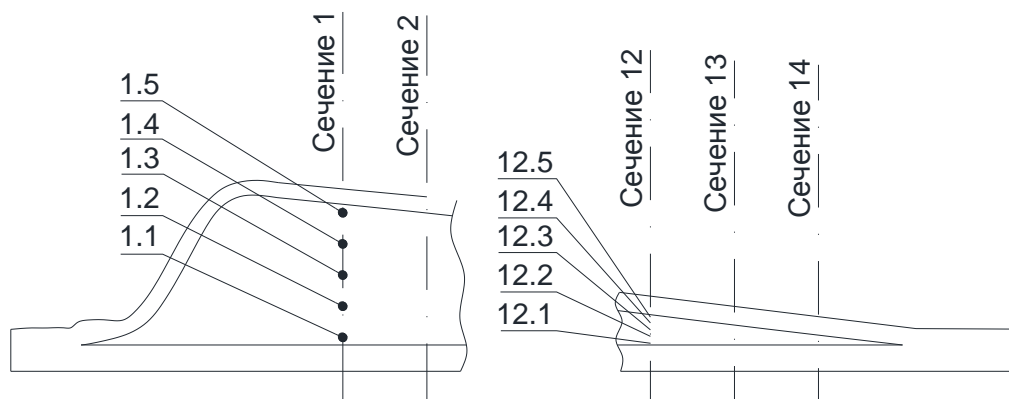


Рисунок 3.28 - Нумерация контрольных точек замера толщины по сечениям ребра заполнителя

Результаты измерений и расчета толщины заполнителя трехслойной клиновидной панели с постоянным шагом продольного гофрового набора в контрольных точках, представлены в таблице 3.6.

Распределение толщины заполнителя с поперечным гофровым набором постоянного шага измерено на образце трехслойной клиновидной панели, представленной на рисунке 3.29.

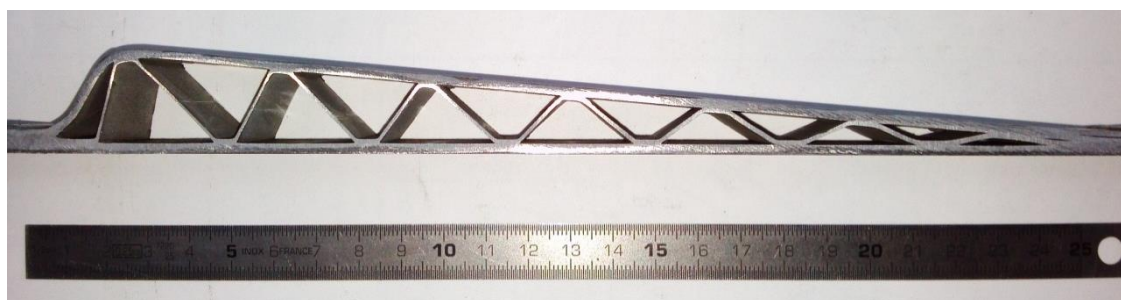


Рисунок 3.29 – Образец сечения заполнителя клиновидной панели с поперечными гофрами постоянного шага

Нумерация ребер заполнителя клиновидной панели с поперечным расположением гофров произведена в регулярной зоне в порядке уменьшения высоты панели и представлена на рисунке 3.30.

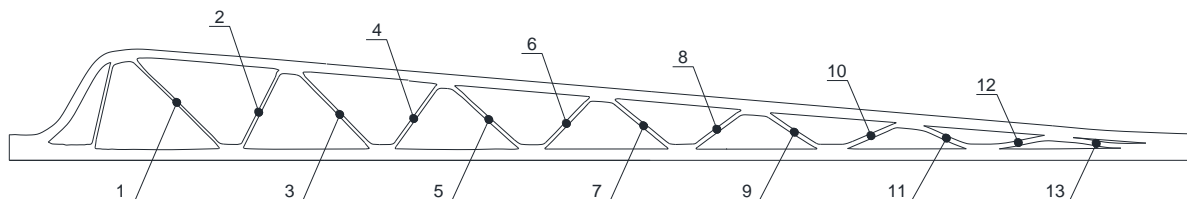


Рисунок 3.30 – Нумерация ребер заполнителя многослойной клиновидной панели с поперечным гофровым набором

В контрольных точках, показанных на рисунке 3.31, произведены замеры толщины заполнителя.

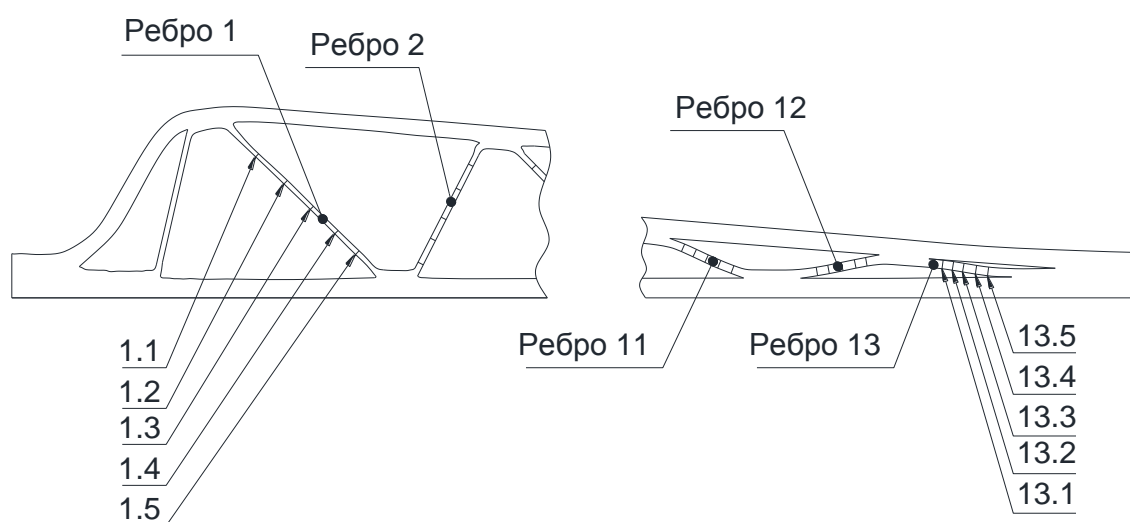


Рисунок 3.31 – Нумерация точек замера толщины по длине ребер заполнителя

Результаты измерений и расчёта толщины заполнителя трехслойной клиновидной панели с постоянным шагом поперечного гофра в различных точках, представлены в таблице 3.7.

Для контрольных точек произведено сравнение значений толщины заполнителя, полученной расчётом по зависимости (2.10) и экспериментальным путём.

Замер толщины заполнителя S_3 в контрольных точках проводился с использованием ультразвукового толщиномера «OLYMPUS 38DL PLUS» с точностью измерений 0,01мм (рисунок 3.32).

Для сравнения полученных толщин заполнителя с расчётными, определена средняя толщина по сечению ребра S_{3cp} как отношение суммы всех толщин по сечению на количество контрольных точек в сечении (рисунок 3.28 и рисунок 3.31):

$$S_{3cp} = \frac{\sum S_3}{n}, \quad (3.2)$$

где S_3 - толщина заполнителя в контрольной точке (зоне) сечения;

n – количество контрольных точек (зон) в сечении.

Средняя толщина по сечению ребра заполнителя сравнивалась с расчётной толщиной S_{3j} , определённой по формуле (2.10). Для определения расчётной толщины определена относительная высота ребра заполнителя в сечении $\bar{H}_j = \frac{H_j}{a_j}$.

Сходимость ζ расчётных толщин и толщин, полученных в результате измерения, определена по формуле:

$$\zeta = \frac{S_{3cp} - S_{3j}}{S_{3cp}} \cdot 100\%. \quad (3.3)$$



Рисунок 3.32 – Ультразвуковой толщиномер «OLYMPUS 38DL PLUS»

Относительная линейная деформация ребра по сечению заполнителя определена по формуле:

$$\delta = \frac{l_3 - a_0}{a_0} \cdot 100\%, \quad (3.4)$$

где l_3 - длина ребра заполнителя в сечении;

a_0 – шаг ребра гофра заполнителя.

Таблица 3.6 - Характеристика толщины заполнителя трехслойной панели с продольными гофрами

№ сечения	№ точки	Результаты измерений			Результаты расчёта			
		S_3	S_{3cp} , (4.1)	l_3	δ , (3.4)	$\bar{H}_{jk} = \frac{H_{jk}}{a_j}$	S_{3jk} , (2.10)	ζ , (3.3)
		мм	мм	мм	%		мм	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.1	0,62	0,584	21,2	112	1,57	0,532	8,9
	1.2	0,61						
	1.3	0,59						
	1.4	0,57						
	1.5	0,53						

Продолжение таблицы 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	2.1	0,64	0,612	20,1	101	1,465	0,558	8,8
	2.2	0,63						
	2.3	0,62						
	2.4	0,60						
	2.5	0,57						
3	3.1	0,66	0,636	18,9	89,7	1,355	0,588	7,5
	3.2	0,65						
	3.3	0,645						
	3.4	0,625						
	3.5	0,60						
4	4.1	0,69	0,669	17,9	78,6	1,239	0,622	7,0
	4.2	0,685						
	4.3	0,68						
	4.4	0,66						
	4.5	0,63						
5	5.1	0,73	0,703	16,8	67,8	1,12	0,659	6,26
	5.2	0,725						
	5.3	0,71						
	5.4	0,69						
	5.5	0,66						
6	6.1	0,76	0,744	15,7	57,3	0,996	0,701	5,8
	6.2	0,76						
	6.3	0,758						
	6.4	0,74						
	6.5	0,70						

Продолжение таблицы 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	7.1	0,80	0,789	14,7	47,4	0,864	0,749	5,1
	7.2	0,79						
	7.3	0,785						
	7.4	0,79						
	7.5	0,78						
8	8.1	0,835	0,828	13,8	37,9	0,736	0,797	3,7
	8.2	0,84						
	8.3	0,825						
	8.4	0,825						
	8.5	0,815						
9	9.1	0,87	0,865	12,9	29,2	0,619	0,842	2,7
	9.2	0,875						
	9.3	0,865						
	9.4	0,865						
	9.5	0,85						
10	10.1	0,90	0,904	12,1	21,2	0,505	0,884	2,2
	10.2	0,905						
	10.3	0,905						
	10.4	0,91						
	10.5	0,90						
11	11.1	0,93	0,93	11,4	14,3	0,385	0,924	0,65
	11.2	0,94						
	11.3	0,935						
	11.4	0,93						
	11.5	0,915						

Продолжение таблицы 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
12	12.1	0,95	0,952	10,8	8,5	0,259	0,958	0,6
	12.2	0,955						
	12.3	0,96						
	12.4	0,955						
	12.5	0,94						
13	13.1	0,965	0,969	10,4	4,1	0,136	0,981	1,2
	13.2	0,97						
	13.3	0,975						
	13.4	0,97						
	13.5	0,965						
14	14.1	0,98	0,984	10,1	1,2	0,017	0,99	0,6
	14.2	0,985						
	14.3	0,99						
	14.4	0,985						
	14.5	0,982						

Сравнение результатов расчёта и измерений толщины заполнителя клиновидной трёхслойной панели с постоянным шагом продольных гофров представлено на рисунке 3.33.

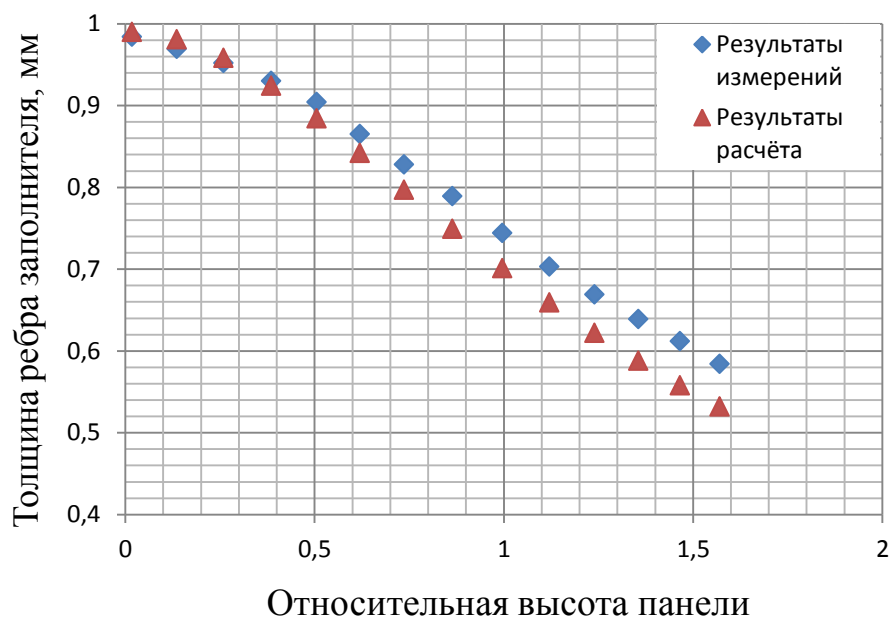


Рисунок 3.33 - Сравнение результатов измерения и расчёта толщины ребра заполнителя клиновидной панели с продольным гофром

Таблица 3.7 - Характеристика толщины заполнителя трехслойной панели с поперечными гофрами

№ ребра	№ зоны	Результаты измерений			Результаты расчёта			
		S_z	$S_{z_{cp}}$	l_z	$\delta, (3.4)$	$\bar{H}_{j_k} = \frac{H_{j_k}}{a_j}$	$S_{z_{j_k}}, (2.10)$	$\zeta, (3.3)$
		мм	мм	мм	%		мм	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.1	0,512	0,53	24,22	142,2	1,64	0,52	1,9
	1.2	0,553						
	1.3	0,495						
	1.4	0,531						
	1.5	0,56						
2	2.1	0,59	0,628	16,37	63,7	1,43	0,573	8,76
	2.2	0,609						
	2.3	0,632						
	2.4	0,641						
	2.5	0,668						

Продолжение таблицы 3.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	3.1	0,63	0,643	20,21	102	1,4	0,581	9,6
	3.2	0,638						
	3.3	0,64						
	3.4	0,649						
	3.5	0,66						
4	4.1	0,671	0,684	14,74	47,4	1,19	0,643	6,0
	4.2	0,678						
	4.3	0,684						
	4.4	0,69						
	4.5	0,696						
5	5.1	0,689	0,718	17,63	76,3	1,16	0,653	9,05
	5.2	0,722						
	5.3	0,72						
	5.4	0,732						
	5.5	0,729						
6	6.1	0,774	0,764	13,23	32,3	0,95	0,726	4,97
	6.2	0,792						
	6.3	0,776						
	6.4	0,716						
	6.5	0,761						
7	7.1	0,785	0,8	14,7	46,9	0,92	0,737	7,9
	7.2	0,786						
	7.3	0,812						
	7.4	0,81						
	7.5	0,81						

Продолжение таблицы 3.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	8.1	0,838	0,839	11,55	15,5	0,71	0,817	2,6
	8.2	0,83						
	8.3	0,842						
	8.4	0,846						
	8.5	0,837						
9	9.1	0,883	0,867	12,28	22,8	0,68	0,829	4,4
	9.2	0,845						
	9.3	0,858						
	9.4	0,881						
	9.5	0,869						
10	10.1	0,906	0,912	11,56	15,6	0,46	0,907	0,55
	10.2	0,9						
	10.3	0,913						
	10.4	0,927						
	10.5	0,912						
11	11.1	0,932	0,937	11	10,1	0,43	0,918	2,0
	11.2	0,942						
	11.3	0,937						
	11.4	0,942						
	11.5	0,933						
12	12.1	0,981	0,976	10,75	7,5	0,22	0,976	0,0
	12.2	0,97						
	12.3	0,981						
	12.4	0,977						
	12.5	0,972						

Продолжение таблицы 3.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
13	13.1	0,979	0,988	10,3	3,0	0,19	0,982	0,6
	13.2	0,984						
	13.3	0,993						
	13.4	0,994						
	13.5	0,99						

Сравнение результатов, полученных в результате расчёта и измерения толщины заполнителя клиновидной трёхслойной панели с постоянным шагом поперечных гофров, представлено на рисунке 3.34.

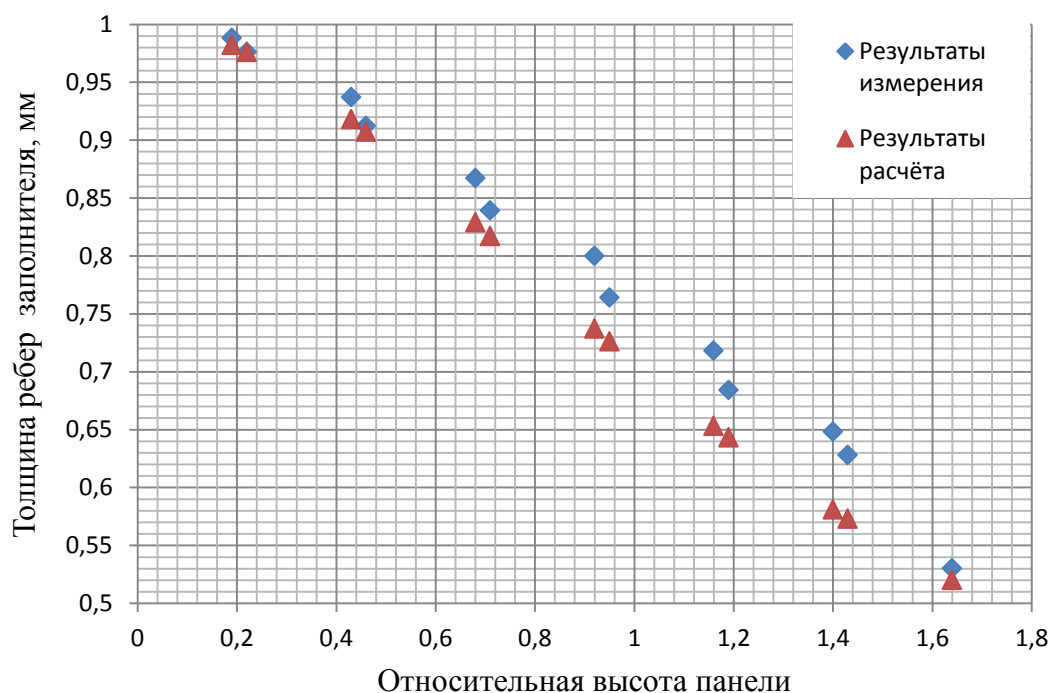


Рисунок 3.34 – Сравнение результатов измерения и расчёта толщины ребра клиновидной панели с поперечным гофром

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1) конструктивно-геометрические параметры панели из титанового сплава BT20 сформированы с учетом рекомендаций приведённых на графике на

рисунке 3.9, в результате чего формовка произошла без образования дефектов (утяжин);

2) формовка осуществлена по рассчитанному графику изменения давления по времени, в результате чего получены клиновидные панели с заданными конструктивно-геометрическими параметрами;

3) сходимость значений толщины заполнителя, полученной в результате расчёта и эксперимента, уменьшается с увеличением относительной высоты панели;

4) максимальное расхождение расчётных и экспериментальных значений толщины по сечению заполнителя не превышает 10%;

5) в среднем превышение экспериментальных значений толщин по отношению к расчётным составляет не более 5%.

В результате экспериментальных исследований выявлены особенности и механика протекания процесса ПТФ клиновидных панелей в виде формы и распределения толщин заполнителя. Результат обработки полученных данных показал сходимость расчётных и экспериментальных данных.

Таким образом, подтверждена работоспособность методики определения конструктивно-геометрических и технологических параметров процесса ПТФ/ДС трёхслойных клиновидных панелей.

3.3 Выводы

Результаты выполненных экспериментальных исследований позволили установить:

1) проведение испытаний требует строгого соблюдения температурно-скоростных условий деформирования в режиме сверхпластичности, что обеспечивается предварительным расчётом графика изменения давления по времени формовки;

2) подтверждено влияние конструктивно-геометрических параметров (соотношения толщин обшивки и заполнителя, относительной высоты ребер) трёхслойных панелей на возникновение дефектов формовки методом виртуального моделирования;

3) в результате экспериментальных работ подтверждена зависимость толщины ребра от относительной высоты панели, получены данные о распределении толщины заполнителя клиновидных панелей для различных значений относительных высот;

4) проведенные эксперименты показали хорошую сходимость результатов измерений и расчётных значений толщин заполнителя, что подтверждает правильность принятых исходных допущений и методик расчёта. Отклонения расчётных значений толщин ребер заполнителя в основном не превышает 5-8%.

4 ОПЫТНЫЕ РАБОТЫ

4.1 Определение свойств сверхпластичности титановых сплавов

Для выполнения работ по исследованию пневмотермической формовки необходимо определить свойства сверхпластичности титановых сплавов, используемых для изготовления клиновидных трехслойных панелей.

Существует несколько методик определения свойств сверхпластичности сплавов [1, 11, 24], в том числе на основе двухосного растяжения [35].

Определение свойств сверхпластичности осуществлено в результате выполнения технологических проб на формуемость титанового сплава ОТ4-1 на основе методики на двухосное растяжение.

Для проведения технологических проб на формуемость применена схема многокупольной формовки с получением в процессе испытаний относительных высот отформованных куполов в диапазоне $\bar{H} = 0.78 \div 1.75$. Схема многокупольной формовки показана на рисунке 4.1.

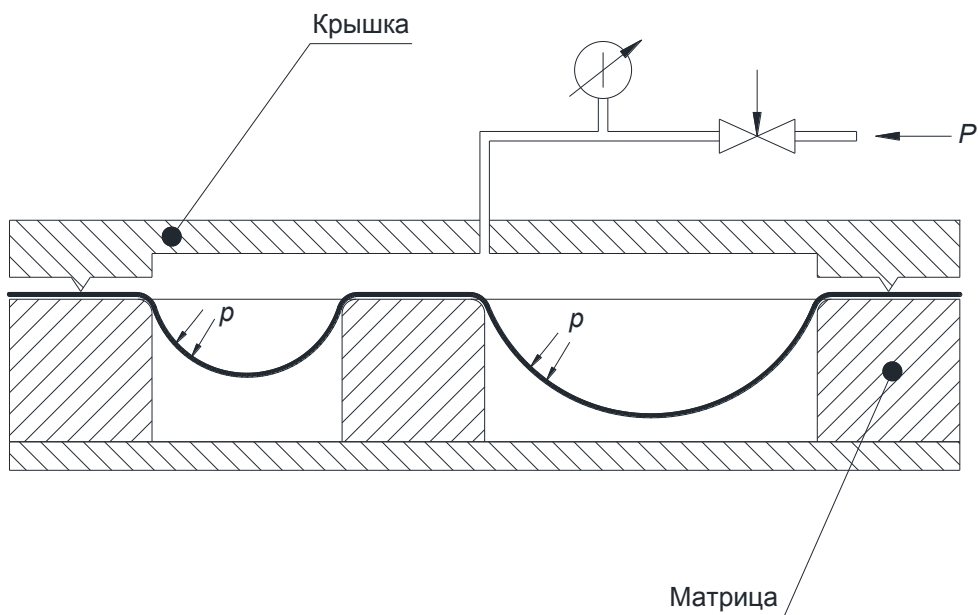


Рисунок 4.1 – Формовка в многокупольную матрицу

Для проведения испытаний на двухосное растяжение спроектирована и изготовлена многокупольная матрица (рисунок 4.2), устанавливаемая в блок прессы FSP 60T (рисунок 3.16).

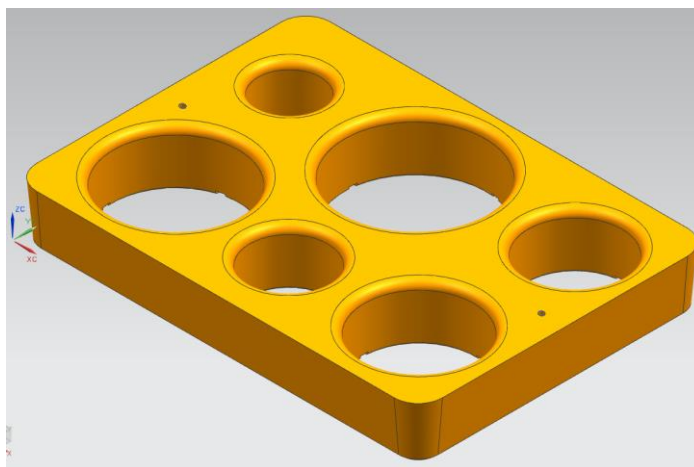


Рисунок 4.2 – Многокупольная матрица

Габаритные размеры матрицы составляют 260x188x35мм. Диаметры отверстий многокупольной матрицы образуют следующий ряд: 90мм, 80мм, 70мм, 60мм, 50мм и 40мм.

Процесс испытания на двухосное растяжение выполняется в следующей последовательности:

- 1) нагрев блока ПТФ до температуры испытания и поддержание данной температуры в течение всего процесса пневмотермической формовки;
- 2) формовка контрольных образцов при фиксированной температуре.

Для выполнения расчетов, по определению свойств СП исследуемого сплава, изготавливают образцы с разной относительной высотой. Предельная относительная высота определяется из условия формовки заготовки до разрушения при заданном давлении. Зафиксированный при этом промежуток времени разделяется на ряд временных интервалов - этапов, обеспечивающих формовку куполов с диапазоном относительных высот от $\bar{H}_{k_i} = 0.3 \div 1.0$. Таким образом, разную относительную высоту куполов получают в результате разной длительности формовки при постоянном давлении. Используя

многокупольную матрицу, получается сразу несколько куполов с различной относительной высотой за одну формовку.

Давление формовки определяется для максимального диаметра основания матрицы по упрощенной формуле:

$$p_i = 1.5\sigma_s \frac{S_0}{R_{max}}, \quad (4.1)$$

где σ_s – напряжение течения для сплава аналога в режиме сверхпластичности;

S_0 – исходная толщина заготовки;

R_{max} – максимальный радиус основания купола (максимальный радиус деформируемой части заготовки).

3) измерение высоты куполов на каждом этапе формовки и расчет относительных высот \bar{H}_{k_i} .

$$\bar{H}_{k_i} = H_{k_i}/R_k. \quad (4.2)$$

где H_{k_i} – высота k -го отформованного купола на i -том этапе формовки;

R_k – радиус основания k -го купола.

4) измерение толщины отформованных куполов в вершине S_{k_i} на каждом этапе формовки;

5) определение напряжения течения в вершинах куполов на каждом этапе формовки по формуле:

$$\sigma_{S_{k_i}} = \frac{1}{4} p_i \frac{R_k}{S_{k_i}} \frac{1 + (\bar{H}_{k_i})^2}{\bar{H}_{k_i}}. \quad (4.3)$$

б) определение приращения интенсивности деформации в вершине купола на каждом этапе формовки по формуле:

$$\Delta\varepsilon_{k_i} = \ln \frac{S_{k_{i-1}}}{S_{k_i}}, \quad (4.4)$$

где $S_{k_{i-1}}$ – толщина стенки в вершине k –го отформованного купола на $(i - 1)$ этапе формовки;

S_{k_i} – толщина стенки в вершине k –го отформованного купола на i –том этапе формовки.

7) определение скорости деформации в вершине купола на каждом этапе формовки:

$$\dot{\varepsilon}_{k_i} = \frac{\Delta \varepsilon_{k_i}}{\tau_i}, \quad (4.5)$$

где τ_i - время формовки i -этапа.

8) построение зависимости $\sigma_{s_{k_i}} = f(\tau_i, \dot{\varepsilon}_{k_i})$ в логарифмической системе координат;

9) определение параметра скоростного упрочнения по формуле:

$$m_i = \frac{\lg\left(\frac{\sigma_{s_{k_i}}}{\sigma_{s_{k_{i-1}}}}\right)}{\lg\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{k_i}}{\dot{\varepsilon}_{k_{i-1}}}\right)}. \quad (4.6)$$

10) определение величины константы A по формуле:

$$A = \frac{\sigma_{s_{k_i}}}{\dot{\varepsilon}_{k_i}^m}. \quad (4.7)$$

A – численно равно напряжению течения, которое имело бы место при $\dot{\varepsilon} = 1.0 \text{ с}^{-1}$.

По приведенному процессу были выполнены технологические пробы и определены свойства сверхпластичности сплава ОТ4-1 ОСТ 1.90013-81. Один из образцов, отформованных в многокупольную матрицу, представлен на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Образец многокупольной формовки

Результаты измерений и расчёта параметров формовки куполов по итогам испытаний представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры сверхпластичности сплава ОТ4-1

№ п/п	Задаваемые параметры			Результаты измерений		Результаты расчёта		
	p_i , МПа	τ_i , с	R_k , мм	S_{k_i} , мм	H_{k_i} , мм	\bar{H}_{k_i}	$\sigma_{S_{k_i}}$, МПа	$\dot{\epsilon}_{k_i} \cdot 10^{-3}$, с ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.1	0,3	570	25	0,815	8,20	0,330	7,82	0,085
1.2			30	0,800	9,15	0,310	10,08	0,110
1.3			35	0,788	11,60	0,330	11,16	0,130
1.4			40	0,775	13,40	0,335	12,85	0,160
1.5			45	0,770	16,80	0,370	13,38	0,170

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2.1	0,3	5990	20	0,760	10,00	0,500	4,93	0,019
2.2			25	0,725	13,10	0,520	6,29	0,027
2.3			30	0,720	17,70	0,590	7,14	0,028
2.4			35	0,657	21,60	0,617	8,94	0,043
2.5			40	0,600	27,20	0,680	10,75	0,058
2.6			45	0,530	34,65	0,770	13,17	0,079
3.1	0,8	1830	20	0,680	9,50	0,475	15,18	0,120
3.2			25	0,630	14,90	0,596	18,05	0,160
3.3			30	0,6	21,30	0,710	21,18	0,190
3.4			35	0,505	28,30	0,810	28,35	0,280
3.5			40	0,36	39,57	0,990	44,45	0,470
4.1	1,2	360	20	0,74	11,40	0,570	18,85	0,385
4.2			25	0,71	14,90	0,590	24,02	0,500
4.3			30	0,66	18,60	0,620	30,45	0,700
4.4			35	0,59	24,90	0,710	37,68	1,010
4.5			40	0,45	32,05	0,800	54,65	1,770
5.1	1,6	230	20	0,78	9,35	0,470	26,73	0,370
5.2			25	0,76	12,00	0,480	33,73	0,490
5.3			30	0,72	13,85	0,460	43,80	0,720
5.4			35	0,65	19,80	0,560	50,26	1,200
5.5			40	0,59	26,55	0,660	58,86	1,600

Аппроксимированные графики зависимостей напряжения течения $\sigma_{S_{k_i}}$ и коэффициента скоростного упрочнения m от скорости деформации $\dot{\epsilon}$ сплава ОТ4-1 в логарифмической системе координат представлены на рисунок 4.4 и рисунок 4.5. Аппроксимация выполнена в ПК Mathcad с помощью функций «regress» и «interp».

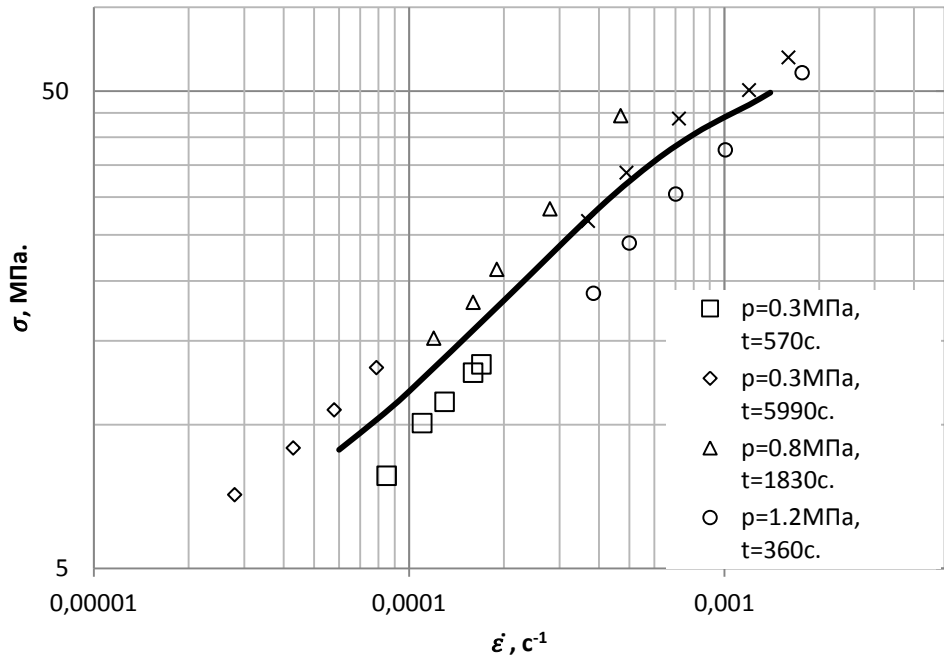


Рисунок 4.4 – График зависимости $\sigma_S = f(\dot{\epsilon}_{k_i})$ титанового сплава ОТ4-1

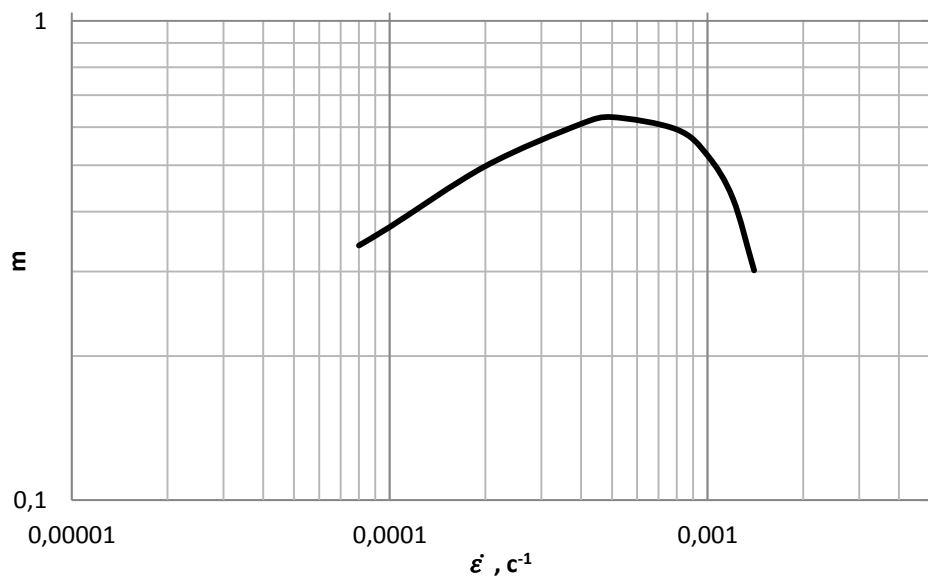


Рисунок 4.5 – График зависимости $m = f(\dot{\epsilon}_{k_i})$ титанового сплава ОТ4-1

Свойства сверхпластичности титанового сплава ОТ4-1, определённые из данных по испытаниям, и других титановых сплавов, в том числе определённых по методике испытаний на двухосное растяжение, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Свойства сверхпластичности титановых сплавов

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_s,$ 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

Таким образом, определены свойства сверхпластичности партии листовых заготовок из титановых сплавов, которые в дальнейшем были использованы для расчета технологических параметров изготовления клиновидных трёхслойных панелей.

4.2 Конструктивно-технологические рекомендации по выбору параметров клиновидных панелей

4.2.1 Рекомендации по выбору конструктивно-геометрических параметров поперечного гофрового набора клиновидной многослойной панели

Геометрическая модель клиновидной трехслойной панели с заданием переменного шага поперечных ребер гофра (рисунок 4.6), в отличие от конструкции с постоянным шагом, может обеспечить равномерную формовку с постоянным утонением ребер гофров по всей ширине панели. Для обеспечения равномерной формовки ребер гофра с постоянным утонением необходимо определить зависимость изменения шага ребра гофра от степени деформации

ε_i . Расчёт выполняется с учетом правил подобия и условия постоянства степени деформации в каждом ребре гофра.

Для недопущения разрушения заполнителя в процессе формовки определяются геометрические параметры ребер таким образом, чтобы в процессе формовки относительная линейная деформация не превышала максимального значения для данного материала заполнителя δ_{max} .

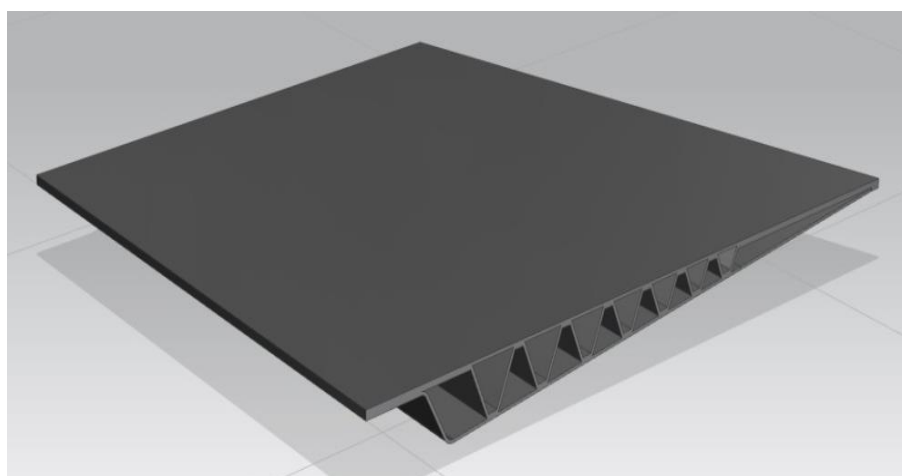


Рисунок 4.6 - Клиновидная конструкция с переменным шагом поперечного гофра

Сечение клиновидной многослойной конструкции с переменным шагом гофра представлено на рисунке 4.7. Участок сварного соединения заполнителя с обшивками d_0 остаётся постоянным для всех гофров, поэтому рассматривается только изменяющаяся первоначальная длина ребер гофров a_j , которая определяет геометрию заполнителя.

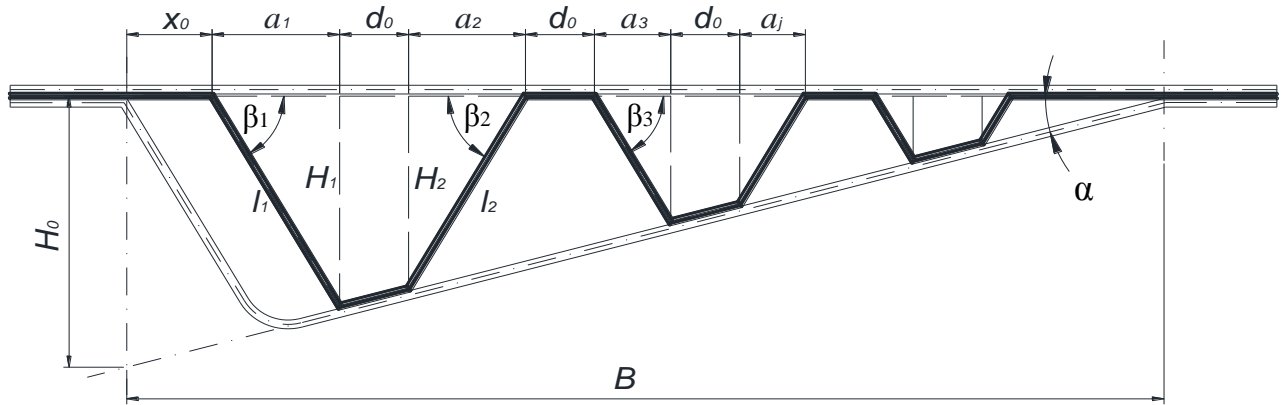


Рисунок 4.7 - Распределение шага гофров

Условие равенства логарифмической деформации ε для каждого ребра заполнителя выражается соотношением (4.8):

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_i. \quad (4.8)$$

или

$$\ln \frac{l_1}{a_1} = \ln \frac{l_2}{a_2} = \dots = \ln \frac{l_i}{a_i}$$

где l_i – длина ребра,

a_i – первоначальная длина ребра гофра.

С учетом обозначений на рисунке 4.7 условие (4.8) для первого гофра преобразуется в выражение:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{a_1}{a_2}. \quad (4.9)$$

Из этого выражения следует условие подобия прямоугольных треугольников, образующих гофр (рисунок 4.8).

Тогда из условия подобия углы наклона ребер заполнителя к плоской стороне конструкции равны между собой $\angle \beta_1 = \angle \beta_2 = \angle \beta_i$.

Угол клиновидной многослойной панели α определяется соотношением:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{H_0}{B} \right). \quad (4.10)$$

Определим параметры первого гофра клиновидной многослойной конструкции в соответствии с рисунком 4.8.

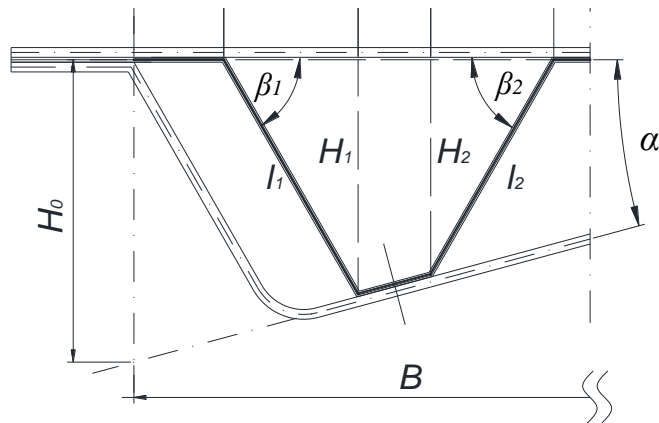


Рисунок 4.8 – Гофр клиновидной многослойной конструкции

Размер неприваренного участка первого ребра гофра a_1 определяется в зависимости от ресурса деформационной способности материала при растяжении δ в режиме сверхпластичности:

$$\delta_{max} \geq \frac{l_1 - a_1}{a_1},$$

$$\frac{a_1}{l_1} \geq \frac{1}{(\delta_{max} + 1)},$$

$$\delta_{max} \cdot a_1 \geq l_1 - a_1,$$

$$a_1(1 + \delta_{max}) \geq l_1,$$

$$a_1 \geq \frac{l_1}{(\delta_{max} + 1)}.$$

Тогда относительная длина первого ребра $\frac{a_1}{l_1}$ определяется выражением:

$$\frac{a_1}{l_1} \geq \frac{1}{(\delta_{max} + 1)}. \quad (4.11)$$

Относительная длина ребра определяет косинус угла β_1 :

$$\cos \beta_1 \geq \frac{1}{(\delta_{max} + 1)},$$

$$\beta_1 \geq \arccos \left(\frac{1}{(\delta_{max} + 1)} \right).$$

Относительная высота панели первого ребра гофра определяется:

$$\bar{H}_1 = \frac{H_1}{a_1},$$

$$\bar{H}_1 = \operatorname{tg}(\beta_1),$$

$$\bar{H}_1 \geq \operatorname{tg} \left(\arccos \left(\frac{1}{\delta_{\max} + 1} \right) \right). \quad (4.12)$$

По ресурсу деформационной способности материала δ_{\max} (относительной линейной деформации) [59] рассчитываются значения относительной длины ребра гофра клиновидной конструкции $\frac{a_1}{l_1}$, угла β_1 и относительной высоты панели для первого ребра гофра \bar{H}_1 .

Для определения оптимальных значений параметров клиновидных панелей используется параметр k - доля от максимальной степени деформации материала, по которому задаётся предпочтительная степень деформации для конкретных требований к конструкции. Тогда значение относительной начальной длины ребра в общем виде определится:

$$\frac{a_j}{l_j} = \frac{1}{(k \cdot \delta_{\max} + 1)}. \quad (4.13)$$

где k – доля от максимальной степени деформации материала, принятая исходя из ограничения величины деформации.

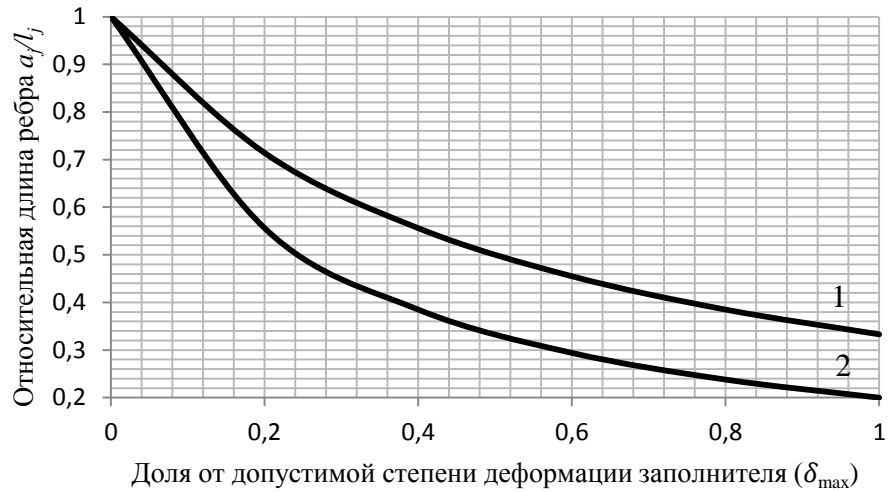
Тогда значение угла β_j определится:

$$\beta_j = \arccos \frac{1}{(k \cdot \delta_{\max} + 1)}. \quad (4.14)$$

Относительная высота панели определяется:

$$\bar{H}_j = \operatorname{tg} \left(\arccos \left(\frac{1}{k \cdot \delta_{\max} + 1} \right) \right). \quad (4.15)$$

Из условия (4.13), в зависимости от требуемой степени деформации заполнителя из титановых сплавов OT4-1 и VT20, можно определить необходимую относительную длину ребра гофра по графикам на рисунке 4.9.

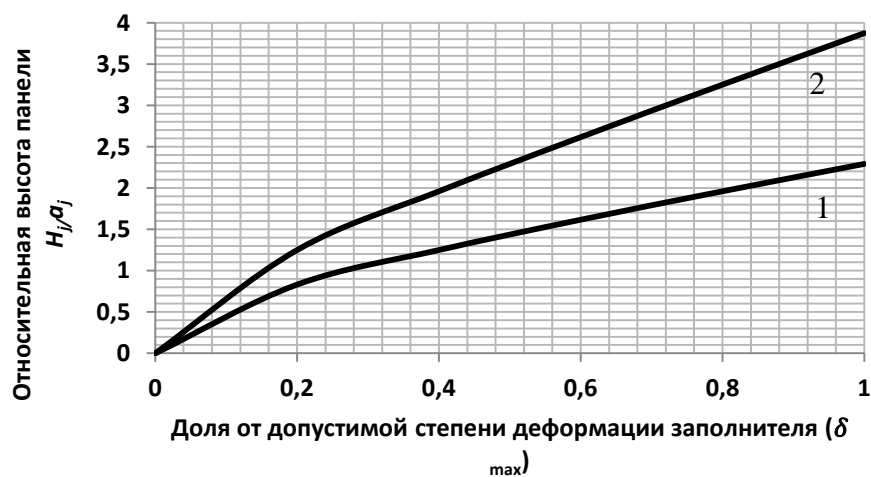


1 – ОТ4-1 ($\delta_{\max}=150\%$); 2 – ВТ20 ($\delta_{\max}=300\%$).

Рисунок 4.9 - Зависимость относительного шага ребра гофра от степени деформации

Сплав ВТ20, обладающий большей деформационной способностью, имеет более широкий диапазон выбора значений относительной длины ребра, чем сплав ОТ4-1 (рисунок 4.9).

На рисунке 4.10 представлены графики зависимости относительной высоты панели от доли максимальной степени деформации сплавов ВТ20 и ОТ4-1, полученные по условию (4.15).



1 – ОТ4-1 ($\delta_{\max}=150\%$); 2 – ВТ20 ($\delta_{\max}=300\%$).

Рисунок 4.10 – Зависимость относительной высоты панели от степени деформации

Первоначальная длина ребра гофра a_1 с условием ограничения степени деформации определяется соотношением:

$$\begin{aligned} a_1 &\geq \frac{(B-(x_0+a_1)) \operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta (\delta_{\max}+1)}, \\ a_1 + \frac{a_1 \operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta (\delta_{\max}+1)} &\geq \frac{(B-x_0) \operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta (\delta_{\max}+1)}, \\ a_1 \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta (\delta_{\max}+1)}\right) &\geq \frac{(B-x_0) \operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta (\delta_{\max}+1)}, \\ a_1 &\geq \frac{(B-x_0) \operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta (\delta_{\max}+1) \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta (\delta_{\max}+1)}\right)}. \end{aligned}$$

Из выражения (4.11) определяется синус угла β :

$$\begin{aligned} \sin \beta &= \sqrt{1 - \cos^2 \beta}, \\ \sin \beta &\geq \sqrt{1 - \frac{1}{(\delta_{\max}+1)^2}}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Тогда:

$$\begin{aligned} a_1 &\geq \frac{(B-x_0) \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 - \frac{1}{(\delta_{\max}+1)^2}} (\delta_{\max}+1) \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 - \frac{1}{(\delta_{\max}+1)^2}} (\delta_{\max}+1)}\right)}, \\ a_1 &\geq \frac{(B-x_0) \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{(\delta_{\max}+1)^2 - 1} \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{(\delta_{\max}+1)^2 - 1}}\right)}. \end{aligned}$$

Значение первоначальной длины первого ребра гофра с учётом заданной доли k от максимальной степени деформации материала определяется соотношением:

$$a_1 = \frac{(B-x_0) \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{(k \cdot \delta_{\max}+1)^2 - 1} + \operatorname{tg} \alpha}. \quad (4.17)$$

Длина первого ребра гофра l_1 определяется соотношением:

$$l_1 = \frac{(B-(x_0+a_1)) \operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta}. \quad (4.18)$$

Высота конструкции в зоне первого ребра гофра определяется соотношением:

$$H_1 = (B - (x_0 + a_1)) \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.19)$$

Используя выражения (4.17), (4.18) и (4.19) определяется первоначальная длина второго ребра a_2 :

$$a_2 = (B - (x_0 + a_1 + d_0)) \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (4.20)$$

Длина второго ребра l_2 определяется соотношением:

$$l_2 = \frac{(B - (x_0 + a_1 + d_0)) \operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta}. \quad (4.21)$$

Аналогично определяются параметры следующего гофра клиновидной конструкции (рисунок 4.11).

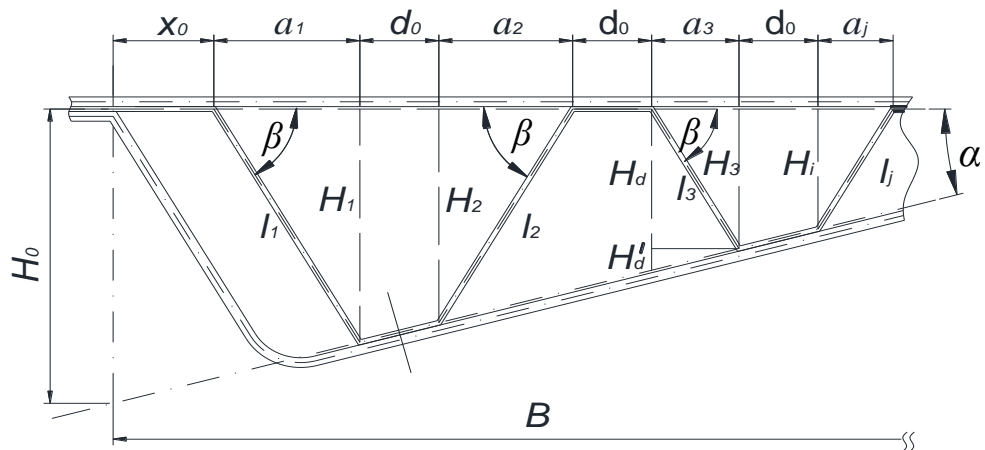


Рисунок 4.11 – Определение параметров второго гофра

Первоначальная длина третьего ребра гофра a_3 определяется соотношением:

$$a_3 = \frac{H_3}{\operatorname{tg} \beta}.$$

С учетом геометрических соотношений на рисунке 4.11 следует:

$$H_3 = H_d - H'_d,$$

$$H_d = (B - (x_0 + a_1 + d_0 + a_2 + d_0)) \operatorname{tg} \alpha,$$

$$\dot{H}_d = a_3 \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Отсюда:

$$a_3 = \frac{(B - (x_0 + a_1 + d_0 + a_2 + d_0)) \operatorname{tg} \alpha}{\left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}\right) \operatorname{tg} \beta}. \quad (4.22)$$

Высота ребра H_3 определяется:

$$H_3 = [B - (x_0 + a_1 + d_0 + a_2 + d_0 + a_3)] \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.23)$$

Длина ребра l_3 после формовки определяется:

$$l_3 = \frac{[B - (x_0 + a_1 + d_0 + a_2 + d_0 + a_3)] \operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta}. \quad (4.24)$$

Последующие первоначальные длины ребер гофра рассчитываются по обобщенной формуле:

$$a_j = \frac{\left(B - \left(x_0 + \sum_{j=1}^n a_{j-1} + (j-1)d_0 \right) \right) \operatorname{tg} \alpha}{1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} \cdot \frac{(1 + (-1)^{j+1})}{2}} \operatorname{tg} \beta. \quad (4.25)$$

где n - количество ребер всех гофров.

Высота ребра гофра:

$$H_j = \left(B - \left(x_0 + \sum_{j=1}^n a_{j-1} + \frac{1 + (-1)^{j+1}}{2} a_j + (j-1)d_0 \right) \right) \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.26)$$

Длина ребра гофра:

$$l_j = \left(B - \left(x_0 + \sum_{j=1}^n a_{j-1} + \frac{1 + (-1)^{j+1}}{2} a_j + (j-1)d_0 \right) \right) \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta}. \quad (4.27)$$

Таким образом, для соблюдения условий сверхпластичного деформирования клиновидных гофровых панелей с поперечными гофрами с постоянной степенью деформацией каждого ребра необходимо устанавливать

переменную первоначальную длину (шаг ребер гофров), геометрические параметры которой рассчитываются по формулам (4.25), (4.26), (4.27).

4.2.2 Рекомендации по выбору конструктивно-геометрических параметров продольного гофрового набора клиновидной многослойной панели

Для панелей с продольным расположением гофрового набора и постоянной начальной длины ребер a_c , наполнитель будет иметь переменную толщину. Удлинение ребер будет изменяться неравномерно и пропорционально изменению угла β_c .

Постоянство степени деформации гофра обеспечивается постоянством угла β и соответственно изменяющимся шагом ребер наполнителя. Поэтому для клиновидных многослойных панелей с продольным гофровым набором более рациональным является задание постоянного угла β_c по ширине панели B .

Клиновидная трёхслойная панель с продольным гофровым набором с изменяющимся шагом ребер гофра представлена на рисунке 4.12.

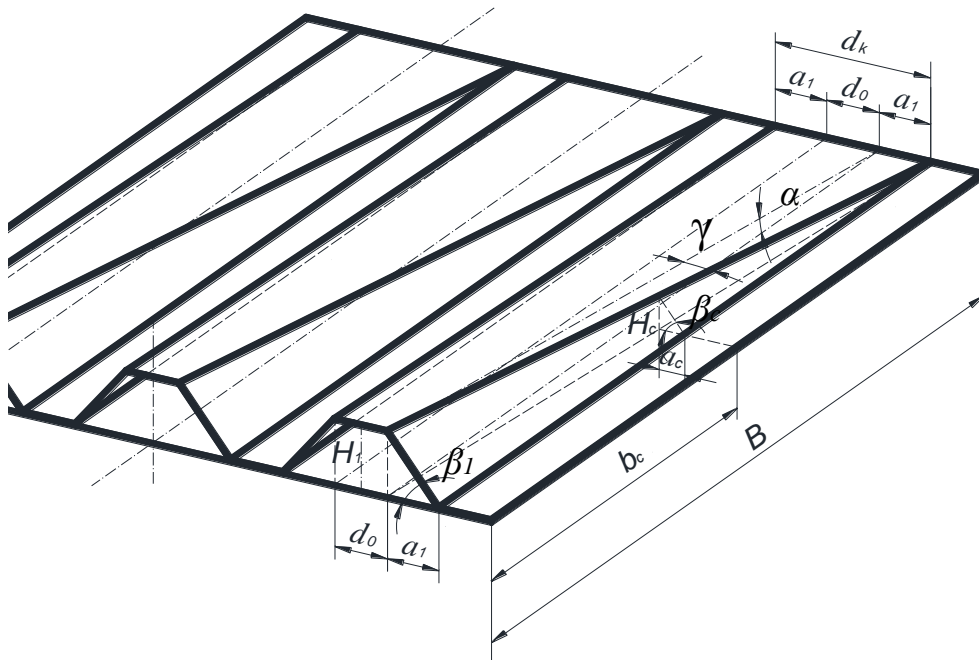


Рисунок 4.12 – Заполнитель трёхслойной гофровой панели с изменяющимся шагом

В конструкции, представленной на рисунке 4.12, зона диффузионной сварки заполнителя с верхней обшивкой изменяется от d_0 до $d_k = 2a_1 + d_0$.

Зона диффузионной сварки заполнителя с нижней обшивкой остается постоянной.

Изменение величины зоны диффузионной сварки определяется углом γ :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma &= \frac{a_1}{B/\cos \alpha}, \\ \gamma &= \operatorname{arctg} \frac{a_1}{B/\cos \alpha}. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Для соблюдения условия сверхпластичности материала в ребрах гофров по всей длине конструкции (обеспечения постоянства скорости деформации) необходимо соблюдать условие постоянства логарифмической степени деформации:

$$\varepsilon_1 = \dots = \varepsilon_i. \quad (4.29)$$

т.е.

$$\ln \frac{l_1}{a_1} = \dots = \ln \frac{l_c}{a_c}.$$

С учетом обозначений на рисунке 4.12 условие (4.29) для продольного гофра преобразуется:

$$\frac{l_1}{a_1} = \dots = \frac{l_c}{a_c}.$$

или

$$\frac{1}{\cos \beta_1} = \frac{1}{\cos \beta_c},$$

тогда $\angle \beta_1 = \angle \beta_c = \angle \beta$.

Угол β определяется выражением:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= \frac{H_1}{a_1}, \\ \beta &= \operatorname{arctg} \frac{H_1}{a_1}, \end{aligned} \quad (4.30)$$

где H_1 – максимальная высота клиновидной панели;

a_1 – начальная длина ребра гофра в зоне максимальной высоты клиновидной панели.

Тогда с учётом (4.30) уравнение (4.28) принимает вид:

$$\begin{aligned}\gamma &= \operatorname{arctg} \left(\frac{H_1}{\operatorname{tg}\beta \cdot B / \cos\alpha} \right), \\ \gamma &= \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin\alpha \cdot \cos\alpha}{\operatorname{tg}\beta} \right), \\ \gamma &= \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin 2\alpha}{2\operatorname{tg}\beta} \right), \\ \gamma &= \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin 2\alpha}{2\bar{H}_c} \right).\end{aligned}\tag{4.31}$$

Таким образом, для клиновидной панели с продольным гофровым набором переменного шага, определяющим параметром является угол γ , который зависит от угла α и относительной высоты панели \bar{H}_c .

С возрастанием угла клиновидной панели α и уменьшением относительной высоты панели \bar{H}_c увеличивается значение угла γ .

Относительная высота выбирается по графику на рисунке 4.10 для данного материала панели в зависимости от предпочтительной степени деформации. По полученным конструктивно-геометрическим параметрам в результате формовки могут быть изготовлены панели с заданной степенью деформации и утонения каждого ребра заполнителя.

4.3 Технологические рекомендации по выбору способа ПТФ

Прежде чем приступать к изготовлению клиновидной трёхслойной панели необходимо учесть важные факторы, влияющие на процесс пневмотермической формовки и зависящие от её конструктивно-геометрических параметров. Подход к способу изготовления основывается на качественном изготовлении панели, для этого необходимо определиться со

способом формовки, а также определить технологические параметры процесса, учитывая особенности способа формовки.

Анализ начинается с выявления конструктивно-геометрических параметров панелей, по которым устанавливается соответствие соотношения толщин заполнителя и обшивки условию (2.45):

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

В случае если условие удовлетворяется, применяется способ обычной формовки. Для формовки панелей технологические параметры процесса определяются по программе, представленной в Приложении 1.

В случае если условие (2.45) не удовлетворяется, применяются дополнительные способы формовки, с использованием подпорной плиты со стороны нижней обшивки, приведенные в пункте 2.4.

Поиск способа формовки осуществляется в последовательности, показанной на схеме подхода к изготовлению клиновидных трёхслойных панелей из титановых сплавов методом ПТФ/ДС (рисунок 4.13).

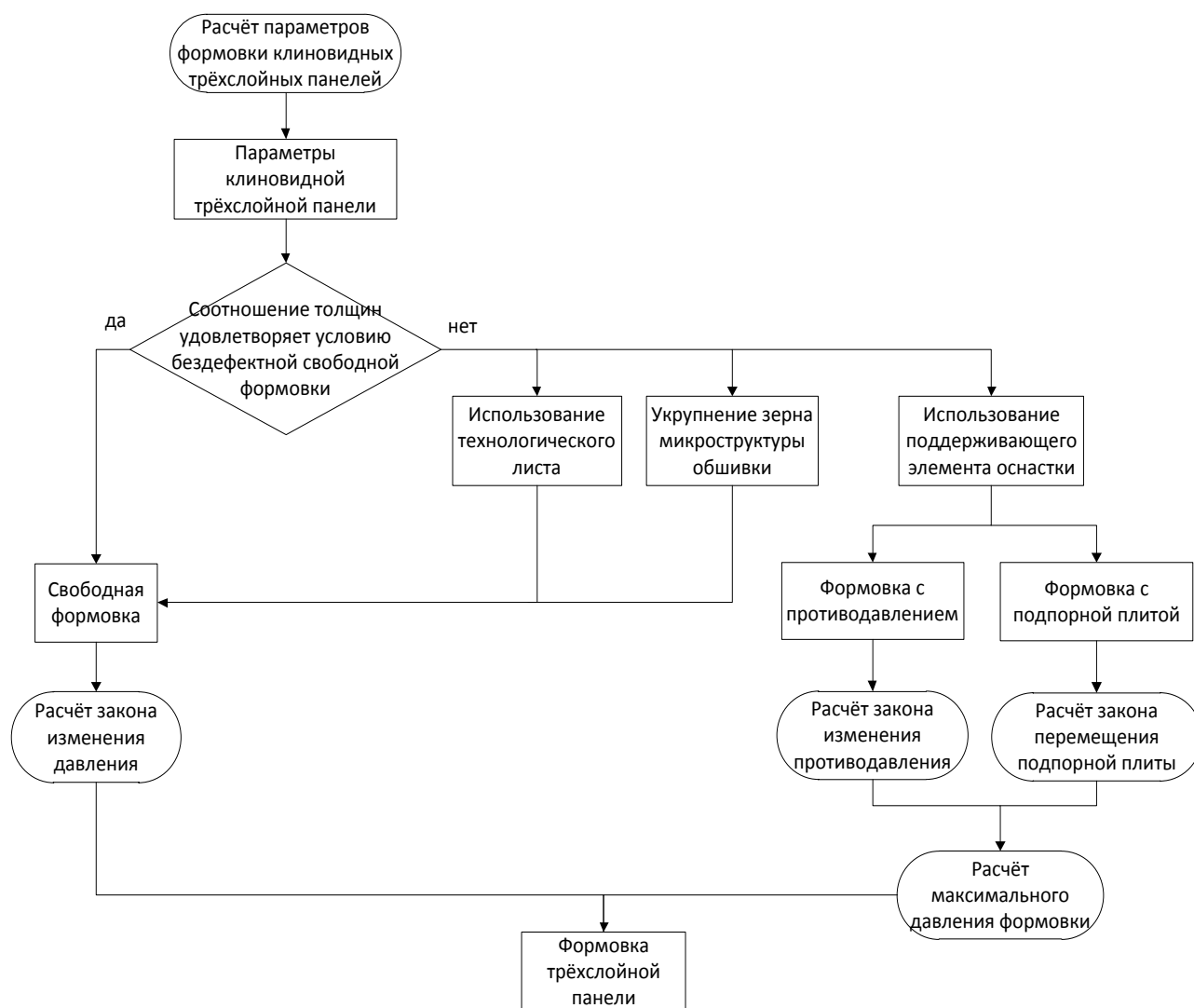


Рисунок 4.13 – Схема подхода к изготовлению клиновидных трёхслойных панелей из титановых сплавов методом ПТФ/ДС

Для каждого конкретного варианта определяются технологические параметры формовки клиновидных панелей, характерные для этого способа:

- расчёт управления давлением в процессе формовки по формулам (2.16), (2.27);
- расчёт времени формовки многослойной клиновидной панели τ_j по формулам (2.22), (2.28);
- для формовки с применением подвижного элемента оснастки определяется скорость поворота подпорной плиты оснастки по формуле (2.52);

- давление газа для формовки многослойной клиновидной панели в случае необходимости создания противодействия определяется по формуле (2.57);

- расчёт максимального давления, подаваемого внутрь панели, для формовки осуществляется по формуле (2.54).

После расчётов составляется программа управления давлением в процессе формовки, по которой осуществляется формовка панели.

4.4 Требования к разработке оборудования

Широкое освоение процессов ПТФ и ПТФ/ДС требует создания специализированного оборудования типа пресс–печь. К такому оборудованию предъявляются требования:

1) обеспечение автономными системами нагрева и поддержания требуемой температуры технологической оснастки (блоков ПТФ, ПТФ/ДС);

2) для изготовления конструкций из титановых сплавов пресс должен быть оборудован нагревательной системой позволяющей варьировать температурой в диапазоне от 0 до 1000°С. Информация о текущей температуре должна подаваться на пульт управления;

3) регулировку температуры зоны нагрева необходимо проводить независимыми регуляторами. Для контроля температуры зоны нагрева могут использоваться термопары. Оснастка должна быть снабжена не менее чем двумя измерительными термопарами;

4) поддержание температуры должно обеспечиваться с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$;

5) обеспечение быстрого перемещения рабочих органов для замыкания и размыкания блоков оснастки для минимизации потерь температуры и продолжительности циклов технологических процессов;

6) обеспечение достаточных усилий для герметизации рабочих полостей технологической оснастки;

7) давление удержания оснастки и обеспечения усилия герметизации должно поддерживаться и при отключенном электроснабжении, чтобы обеспечить безопасность и сохранность процесса при отключении питания;

8) оборудование должно иметь устройство защиты от приложения избыточного усилия на оснастку или ее неправильного позиционирования для остановки перемещения плунжера;

9) возможность начала формовочного цикла должна обеспечиваться только после достижения заданной температуры нагрева оснастки;

10) система управления должна быть обеспечена защитой от выхода из строя в случае падения давления и возможностью переключения на аварийную систему обеспечения;

11) обеспечение оборудования регулируемые системы подачи газа и системами вакуумирования. Для осуществления процесса ПТФ/ДС достаточно 3 газовых линии. Каждая газовая линия должна иметь возможность подвода к полостям оснастки или пакета заготовок. В качестве рабочего газа должен использоваться аргон или воздух;

12) система регулировки газового давления должна быть связана с системой контроля, каждая газовая линия должна быть подсоединена к вакуумной системе, системе продувки газом и системе газового давления для формовки или калибровки детали;

13) газопроводы для формовки должны быть оборудованы сервоклапанами входа/выхода для аналогового управления подачей газа и датчиками давления на выходе из блока пресса и на входе в полость оснастки;

14) для снижения риска падения давления в каждой газовой линии контроль давления должен обеспечиваться датчиком абсолютного давления, находящимся непосредственно на входе в полость оснастки или пакета заготовок;

15) система контроля и управления процессом должна обеспечивать непрерывность и возможность изменения рабочих параметров процесса оператором, в том числе: регулировку рабочих циклов формования детали, систему бесперебойного питания для завершения процесса формования при отключении электропитания;

16) оснащение передвижным столом для загрузки-разгрузки оснастки;

17) возможность подключения сенсора для измерения деформации заготовок при испытаниях на двухосное растяжение;

18) система безопасности должна быть оснащена аварийной сигнализацией, предупреждающей о высокой или низкой температуре гидравлической жидкости, недостатке гидравлической жидкости, высокого или низкого давления в гидравлической системе, загрязнения масляного фильтра, утечки охлаждающей жидкости или газов, повышенной температуре нагрева. Также в системе безопасности должны быть предусмотрены концевые выключатели предотвращения превышения допустимого хода плунжера и защитные устройства от воздействия рабочего усилия пресса при аварийной или нештатной ситуации;

19) желательно, чтобы оборудование было оснащено системой с программным обеспечением, проводящим мониторинг, контроль и управление параметрами процесса (усилие гидросистемы, температура и давление газа), постоянным контролем технологического процесса и его циклов, возможностью регулировки программы изменения параметров рабочих циклов (время, давление газа), контролем безопасности систем оборудования и последовательностью набора команд для изготовления деталей.

4.5 Рекомендации по разработке технологического оснащения

Рекомендации по разработке оснащения, для осуществления процесса ПТФ/ДС:

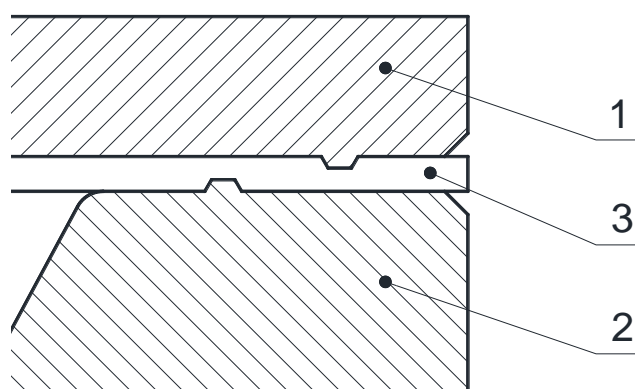
1) оснастка должна работать при повышенных температурах, для титановых сплавов эти температуры достигают 1000°C . Поэтому рекомендуемыми материалами для изготовления оснастки являются жаропрочные стали, длительно работающие при повышенных температурах;

2) точное регулирование температуры требует измерения температуры оснастки, для этого должны быть предусмотрены отверстия для закладки термопар;

3) оснастка должна выдерживать приложение максимальных нагрузок прессы и действующего давления формовки, при воздействии высоких температур;

4) в оснастке должна быть предусмотрена возможность герметизации заготовки, либо пакета заготовок для осуществления процессов формовки и диффузионной сварки;

В качестве элемента герметизации при изготовлении небольших конструкций применяется герметизирующий зуб по контуру оснастки (рисунок 4.14). Зуб под действием сжимающего усилия прессы внедряется в материал заготовки и тем самым обеспечивает герметизацию.



1 - верхний блок, 2- нижний блок, 3 - заготовка

Рисунок 4.14 – Герметизирующий зуб

5) для получения качественной поверхности изготавливаемых конструкций, необходимо обеспечить шероховатость поверхности матрицы

высокого класса, так как при формовке в режиме сверхпластичности на поверхности заготовок отпечатываются все микронеровности поверхности матрицы;

б) в оснастке должно быть предусмотрено подведение газовых линий. Для формовки трёхслойных конструкций необходимы три газовые линии. Для сложных многослойных конструкций может потребоваться увеличить количество газовых линий. Газовые линии должны иметь возможность заглушиваться в случае их невостребованности;

7) для возможности закладки заготовок, извлечения готовых изделий, а также замены оснастки должны быть предусмотрены элементы для её перемещения, такие как такелажные узлы или др.;

8) для обеспечения позиционирования верхнего и нижнего элементов оснастки относительно друг друга должны быть предусмотрены штифты. Штифты также облегчают позиционирование заготовок при закладке их в оснастку;

9) для удобства замены матриц и предотвращения их заклинивания, должны быть предусмотрены позиционирующие бобышки, либо пазы в конструкции оснастки;

10) для изготовления сложных изделий необходимо предусматривать дренажные отверстия в матрице, для возможности выхода остатков газа между матрицей и заготовкой в процессе формовки и её полному прилеганию к матрице.

Для изготовления четырёх - пятислойных конструкций методом пневмотермической формовки и диффузионной сварки был спроектирован и изготовлен блок в сборе, с двумя полостями под сменные матрицы, представленный на рисунке 4.15, с учётом выше перечисленных рекомендаций.

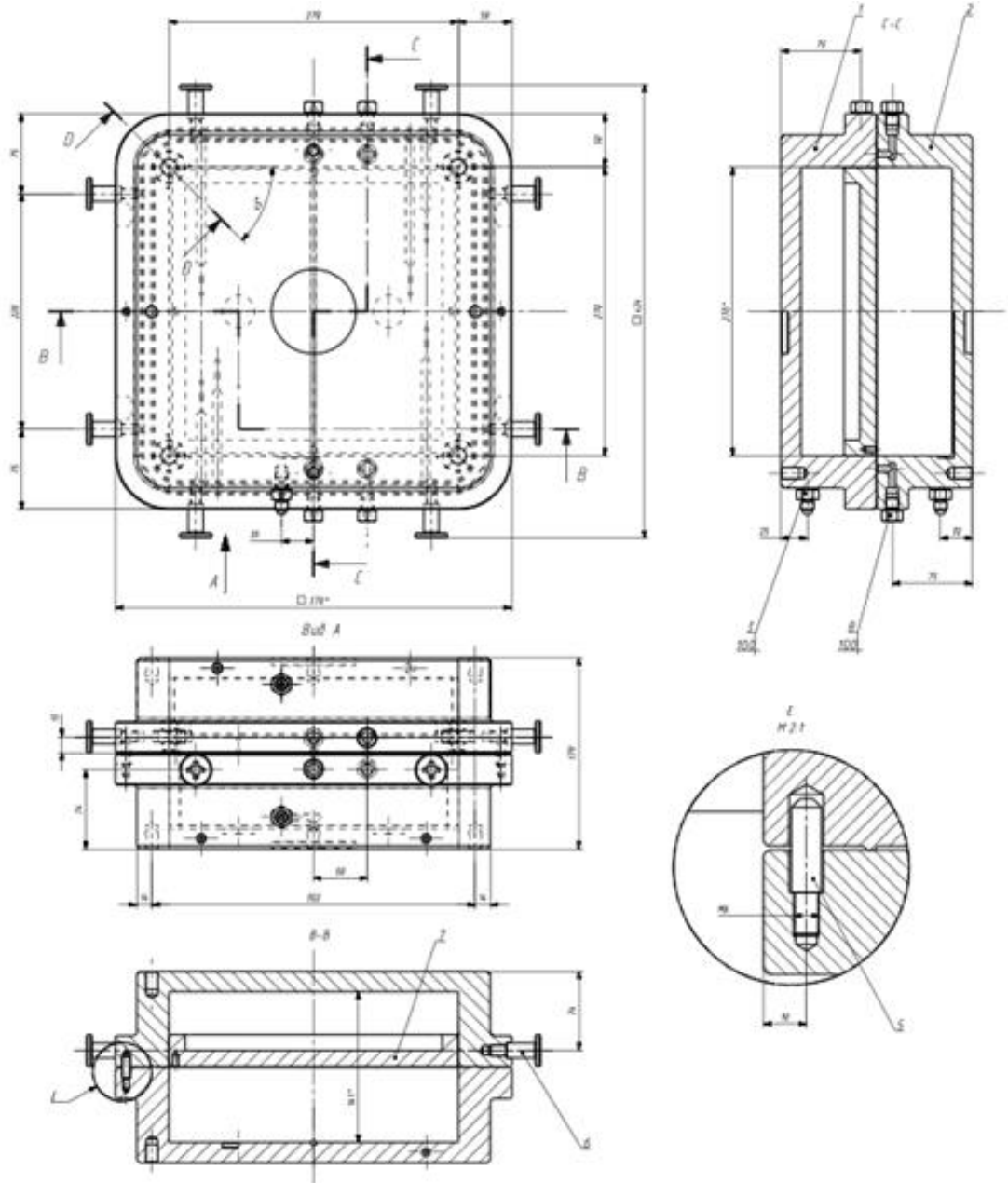


Рисунок 4.15 – Схема блока с двумя формовочными полостями

В блоке между крышкой 1 и корпусом 2, с помощью зубьев зажимается листовая заготовка, либо пакет заготовок. Крышка и корпус оснащены такелажными узлами 6 для перемещения блока и закладки заготовок. Крышка и корпус при смыкании базируются с помощью штифтов 5. Штифты также служат для базирования заготовки при её закладке. Перед формовкой в блок устанавливаются матрицы. В верхний блок устанавливается матрица (верхняя вставка 7) и закрепляется специальными замками 4. После достижения заданного режима формовки через штуцера 3 внутрь полостей блока подаётся

давление газа, либо вакуум. Невостребованные газовые линии перекрываются заглушками 8. На рисунке 4.16 представлена электронная модель блока.

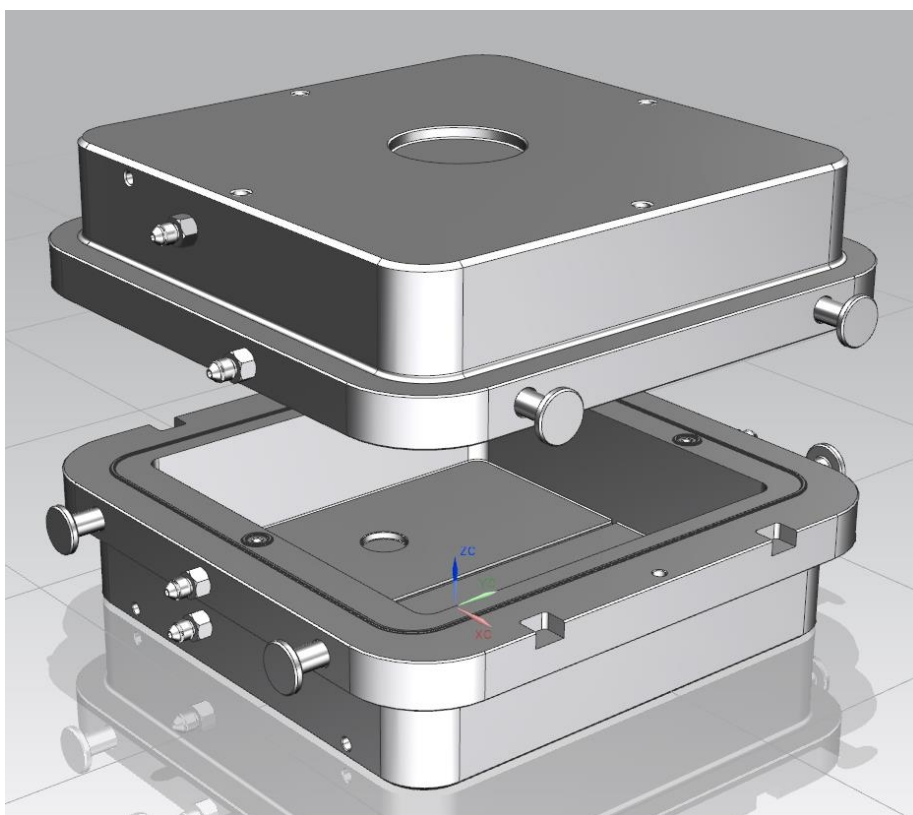


Рисунок 4.16 - Модель блока с двумя формовочными полостями

В блоке существует возможность изготавливать сложные детали и конструкции, как из листовых, так и из трубных заготовок.

4.6 Опытное изготовление трёхслойных клиновидных панелей

По рекомендациям, приведённым в пункте 4.2.1, разработанным для клиновидных панелей, изготовлена гипотетическая конструкция трёхслойной клиновидной панели с переменным шагом поперечно-расположенных рёбер из сплава ОТ4-1.

Для гипотетической клиновидной панели с поперечным гофровым набором принята степень деформации заполнителя равная 40%. По зависимости на рисунке 4.10 для доли от допустимой степени деформации

сплава ОТ4-1 равной $k = 0,267$ относительная высота панели равна $\bar{H} = 1,0$. Тогда при максимальной высоте заполнителя $H_1 = 16$ мм, шаг первого ребра гофра равен $a_1 = H_1 = 16$ мм. Угол наклона β_1 первого ребра гофра в этом случае будет равен $\beta_1 = 45^\circ$. Для обеспечения постоянства степени деформации каждого ребра необходимо соблюдать условие равенства углов наклона всех остальных ребер, поэтому углы β ребер заполнителя также равны 45° .

На рисунке 4.17 представлена клиновидная панель с переменным шагом ребер с соотношением толщин обшивки и заполнителя $S_0/S_3 = 2$. Толщиной обшивки 2 мм. Клиновидная панель имеет гофровый заполнитель шириной $B=220$ мм, числом ребер гофров $n=14$.

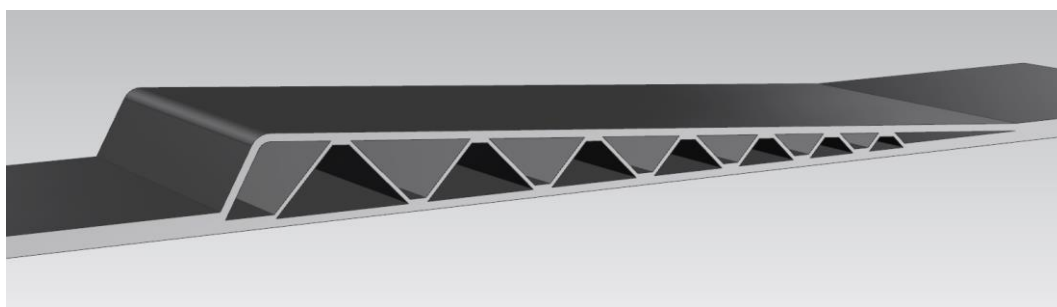


Рисунок 4.17 – Клиновидная панель с переменным шагом ребер

Режимы формовки рассчитаны по методике, представленной в приложении 1 и зависимостям, приведенным в главе 2.

График зависимости формирующего давления по времени, для изготовления клиновидной панели с поперечно расположенным гофровым заполнителем с переменным шагом ребер из сплава ОТ4-1, представлен на рисунке 4.18.

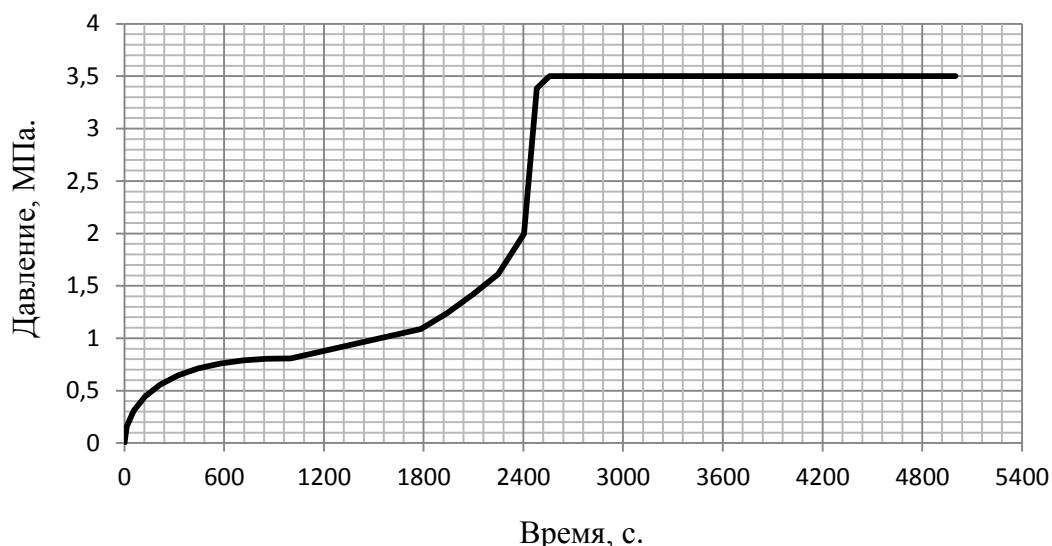


Рисунок 4.18 - График изменения давления формовки по времени для клиновидной панели с переменным шагом ребер из титанового сплава OT4-1

По полученному графику зависимости на прессе «FSP 60T» изготовлена трёхслойная клиновидная панель с переменным шагом поперечно расположенных ребер, представленная на рисунке 4.19.



Рисунок 4.19 – Трёхслойная клиновидная панель с переменным шагом ребер из сплава OT4-1

На рисунке 4.20 показан разрез клиновидной панели с переменным шагом поперечно расположенных ребер.



Рисунок 4.20 – Разрез трёхслойной клиновидной панели с переменным шагом ребер из сплава ОТ4-1

На рисунке 4.21 показано сечение трёхслойной клиновидной панели с переменным шагом поперечно расположенных ребер.

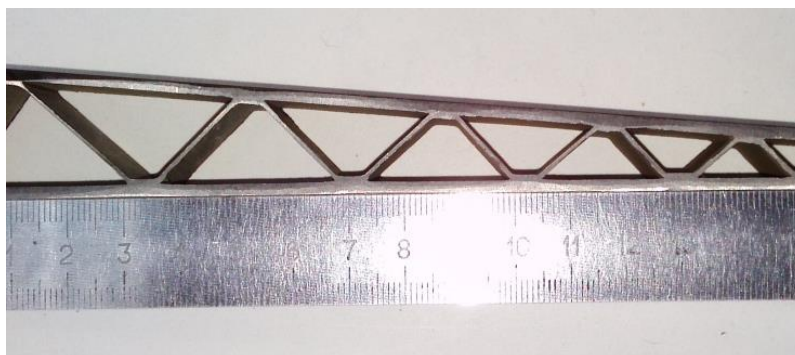


Рисунок 4.21 – Сечение трёхслойной клиновидной панели с переменным шагом ребер из сплава ОТ4-1

На рисунке 4.22 показана нумерация ребер заполнителя в регулярной зоне формовки, не учитывающей влияние концевой зоны и законцовки.

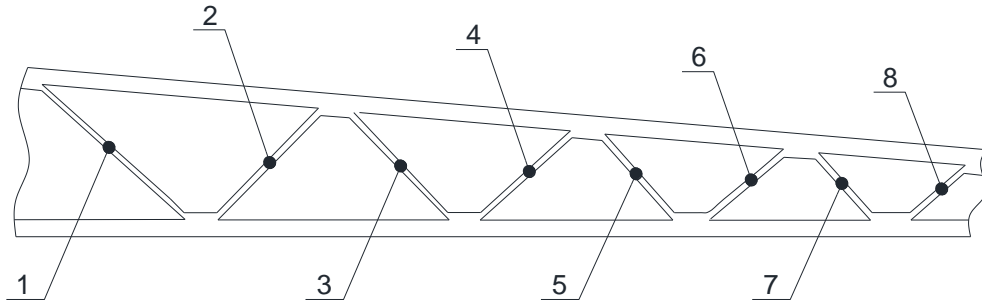


Рисунок 4.22 – Нумерация ребер заполнителя многослойной клиновидной панели с поперечным гофровым набором из сплава ОТ4-1

В контрольных точках, показанных на рисунке 4.23, произведены замеры толщины заполнителя на образце, показанном на рисунке 4.21.

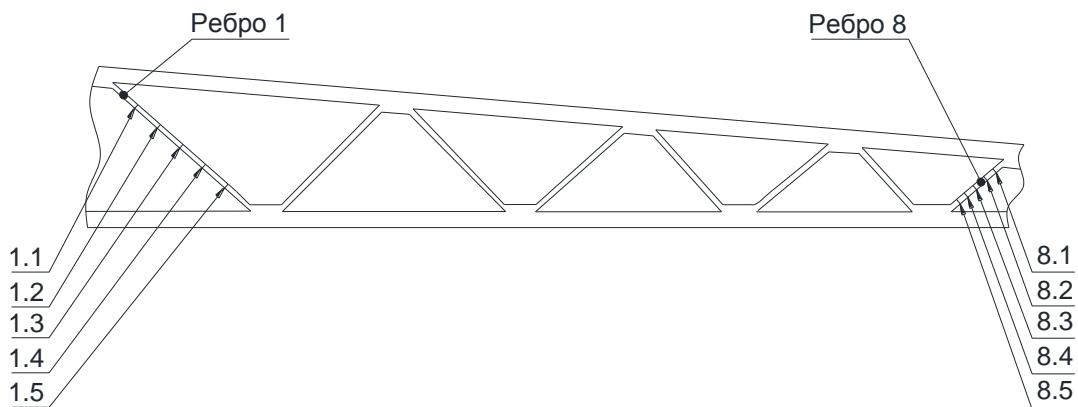


Рисунок 4.23 – Нумерация точек замера толщины по длине ребер заполнителя из сплава ОТ4-1

Результаты измерений и расчёта толщины заполнителя трехслойной клиновидной панели с переменным шагом поперечного гофра в различных точках, представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Толщина заполнителя трехслойной панели с переменным шагом поперечных ребер из титанового сплава ОТ4-1

№ ребра	№ зоны	Результаты измерений			Результаты расчёта					
		S_z , мм	S_{zcp} , мм	l_z , мм	δ , (3.4), %	$\bar{H}_i = \frac{H_i}{a_0}$	S_{zi} , (2.10) мм	ζ , (3.3) %		
1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	1.1	0,63	0,65	24,50	67,6	1,0	0,707	8,7		
	1.2	0,65								
	1.3	0,65								
	1.4	0,67								
	1.5	0,64								
2	2.1	0,75	0,77	18,70	53,3			1,0	0,707	8,2
	2.2	0,765								
	2.3	0,768								
	2.4	0,78								
	2.5	0,78								
3	3.1	0,71	0,72	17,80	50,7	1,0	0,707			1,8
	3.2	0,722								
	3.3	0,718								
	3.4	0,73								
	3.5	0,73								
4	4.1	0,755	0,768	15,70	60,4			1,0	0,707	8,0
	4.2	0,765								
	4.3	0,775								
	4.4	0,774								
	4.5	0,762								

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9		
5	5.1	0,768	0,77	13,50	43,5	1,0	0,707	8,2		
	5.2	0,77								
	5.3	0,77								
	5.4	0,78								
	5.5	0,765								
6	6.1	0,72	0,75	12,60	63,0			1,0	0,707	5,7
	6.2	0,75								
	6.3	0,74								
	6.4	0,75								
	6.5	0,77								
7	7.1	0,70	0,718	10,30	36,2	1,0	0,707	1,5		
	7.2	0,72								
	7.3	0,73								
	7.4	0,73								
	7.5	0,71								
8	8.1	0,77	0,773	9,40	64,0	1,0	0,707	8,5		
	8.2	0,774								
	8.3	0,77								
	8.4	0,78								
	8.5	0,771								

Сравнение результатов, полученных расчётом и измерением толщины заполнителя клиновидной трёхслойной панели с переменным шагом поперечных ребер гофра, показывает хорошую сходимость. Максимальное расхождение расчётных и экспериментальных значений толщины по сечению заполнителя составило менее 10%. Таким образом, методика расчёта переменного шага ребра гофра применима для определения параметров заполнителя клиновидных трёхслойных панелей постоянного утонения.

4.7 Исследование качества материала панелей после процесса ПТФ/ДС

Для определения влияния, оказываемого сверхпластическим деформированием, был проведён сравнительный анализ микроструктуры металла до и после формования. Выполнен анализ образцов из титановых сплавов ВТ20, ОТ4-1 в исходном состоянии материала и после деформирования. Все образцы исследованы в двух сечениях перпендикулярных поверхности листа: сечение 1 и сечение 2 (рисунок 4.24).

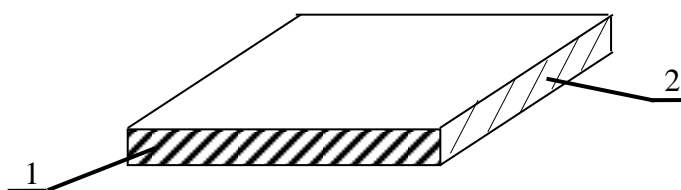


Рисунок 4.24 - Общий вид листа и исследуемые сечения

При этом, в каждом из сечений микроструктура рассмотрена в двух положениях: в центре и ближе к краю (рисунок 4.25).

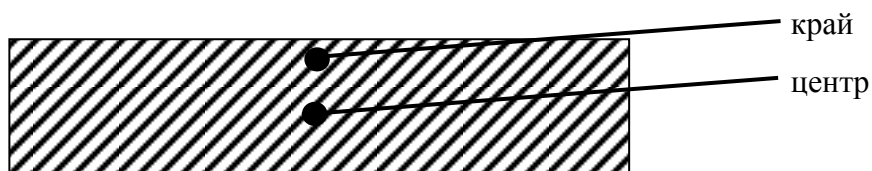


Рисунок 4.25 - Исследуемые области каждого из сечений

Основным методом исследования служил металлографический анализ с применением оптического микроскопа «Olympus GX51» (рисунок 4.26).



Рисунок 4.26 - Оптический микроскоп «Olympus GX51»

Шлифы подготавливались по общепринятой методике, заключающейся в шлифовке на шлифовальной (наждачной) бумаге различной зернистости с постепенным переходом от более грубого к более тонкому абразиву и последующей полировке с использованием суспензии «Colloidal Silica» для титановых сплавов. Для травления полученных шлифов использовали реактив «Келлера».

Микроструктура недеформированных образцов из сплава BT20 в исходном состоянии с разной степенью увеличения показана на рисунке 4.27.

Согласно данным металлографического анализа псевдо- α -титанового сплава в недеформированном состоянии свойственна структура с зернистой α -фазой и присутствием между α -зернами областей превращенной β -фазы (превращенная β -фаза представлена α -фазой пластинчатого строения с тончайшими прослойками равновесной β -фазы).

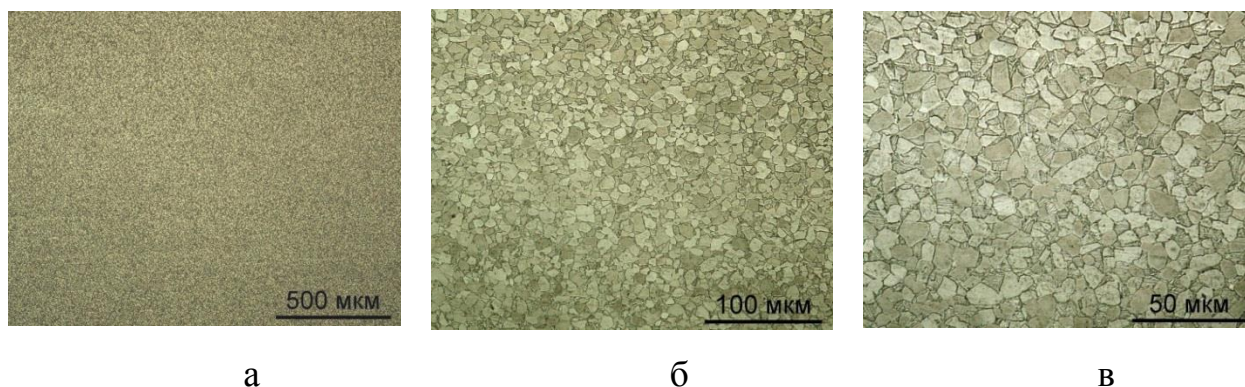


Рисунок 4.27 - Микроструктура недеформированных образцов из сплава BT20

Данная структура сформирована после рекристаллизационного отжига при температурах однофазной α -области. Основной характеристикой такой структуры является размер зерен.

Принципиальных отличий в структуре в двух перпендикулярных сечениях (сечение 1 и сечение 2) не выявлено. Кроме того, нет принципиальных отличий в микроструктурах областей «край» и «центр» по сечению шлифов.

Размер зерна в такой структуре в среднем равен 5,5...7 мкм, при этом наибольший размер α -зерна достигает 17...20 мкм.

Микроструктура деформированных образцов из сплава ВТ20 с разной степенью увеличения показана на рисунке 4.28.

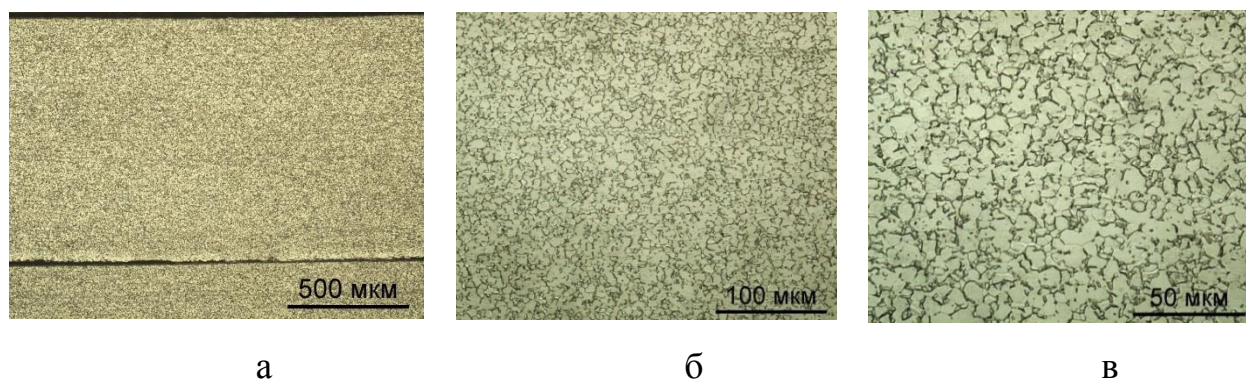


Рисунок 4.28 - Микроструктура деформированных образцов из сплава ВТ20

По данным различных литературных источников, температура полиморфного превращения для данного сплава составляет 980-1020°C. В связи с этим, деформация при температурах 910-950°C ($T_{\text{пп}}=70...110^\circ\text{C}$), при низких скоростях с утонением листа приводит к достаточно хорошо проработанной структуре (рисунок 4.28а) по всему сечению листа (от верхнего края до нижнего). Линии интенсивного течения металла очень слабо выражены.

Принципиальных отличий в структуре в двух перпендикулярных сечениях (сечение 1 и сечение 2) не выявлено.

Структура представлена зернистой α -фазой. В тройных стыках зерен наблюдается лишь очень малая доля β -фазы. Зерна полиэдрические (равноосные, рекристаллизованные).

Размер зерна в такой структуре в среднем равен 4,5...5,5 мкм, при этом наибольший размер α -зерна достигает 8...10 мкм.

Проведён анализ микроструктуры образцов из титанового сплава ОТ4-1 в исходном состоянии и после деформирования.

Микроструктура недеформированных образцов материала ОТ4-1 показана на рисунке 4.29.

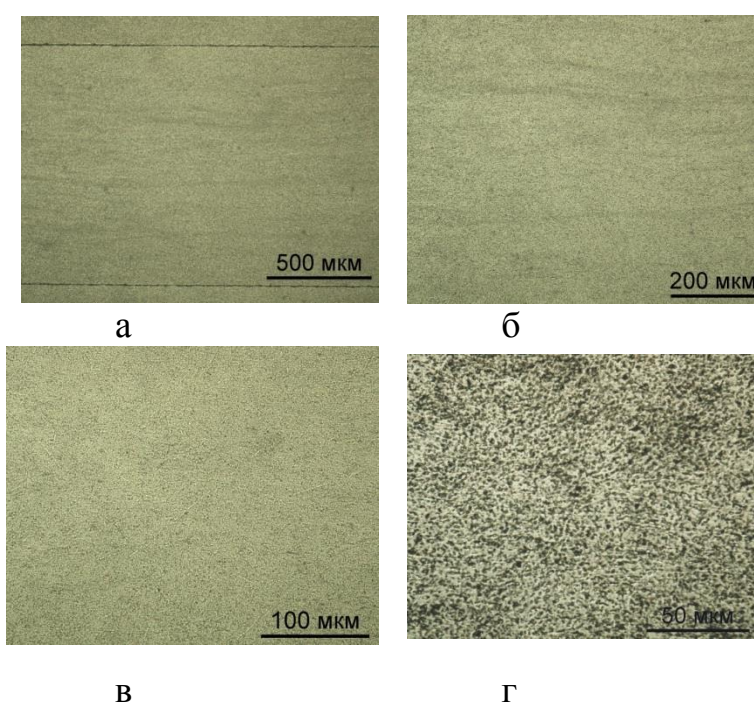


Рисунок 4.29 - Микроструктура недеформированных образцов из сплава ОТ4-1

Микроструктура листа из сплава ОТ4-1 получена при горячей деформации с окончанием в $(\alpha+\beta)$ -области. Для микроструктуры особенно в центральной части листа наблюдается присутствие характерных линий деформационного течения (рисунок 4.29а, рисунок 4.29б). В ходе технологического цикла получения листа при его деформации в β -области протекала динамическая рекристаллизация, что проявилось в разном зернистости структуры β -фазы. Так, спектр размеров β -зерен, составляет 200...650 мкм.

Окончание деформации в $(\alpha+\beta)$ -области приводит к распаду метастабильного β -твердого раствора с образованием α -фазы. Выделяющиеся при распаде дисперсные частицы α -фазы в ходе деформации интенсивно дробятся. В результате этого внутризеренная структура становится мелкодисперсной. Численные характеристики продуктов распада (частиц α -фазы) определить металлографическим методом не удастся.

В целом по рисунку 4.29г, можно сказать, что максимальный размер частиц первичной α -фазы (глобулярной формы) составляет 2,5 мкм, вторичная α -фаза представлена, скорее всего, тонкопластинчатыми выделениями еще более меньших размеров.

Принципиальных отличий в структуре в двух перпендикулярных сечениях (сечение 1 и сечение 2) не выявлено. Кроме того нет принципиальных отличий в микроструктурах областей «край» и «центр» по сечению шлифов.

Микроструктура деформированных образцов из сплава ОТ4-1 представлена на рисунке 4.30.

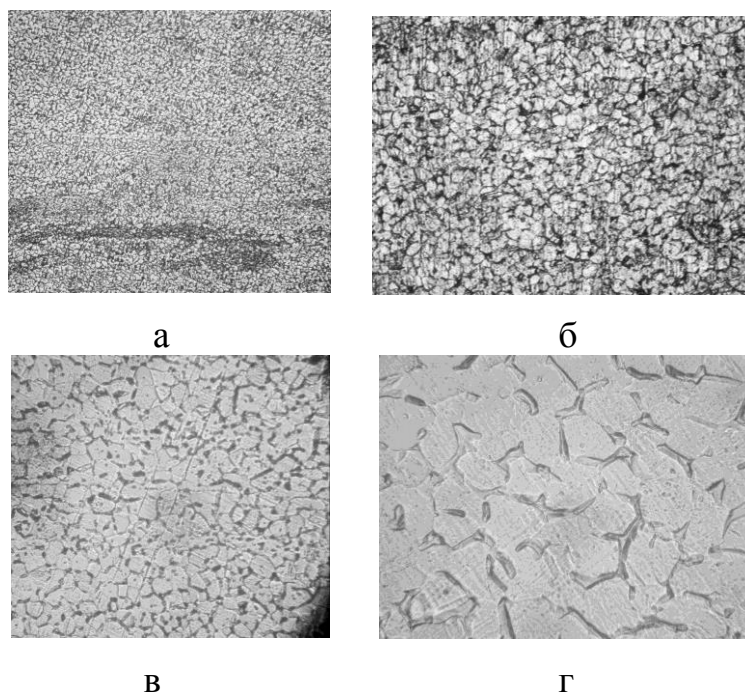


Рисунок 4.30 - Микроструктура деформированных образцов из сплава ОТ4-1

Температура полиморфного превращения для сплава ОТ4-1 составляет 910-925°C. Таким образом, деформация в интервале 880-895°C ($T_{mn}-20...30^\circ\text{C}$), приводит к росту зерна, по всему сечению листа, это происходит вследствие того, что при $T > 720..750^\circ\text{C}$ процесс первичной рекристаллизации переходит в собирательную стадию, которая протекает без образования новых рекристаллизационных центров, а протекает только за счет поглощения соседними зернами друг друга. Незначительная скорость деформации не приводит к образованию новых линий течения, однако в менее деформированных листах по прежнему с трудом можно выделить линии течения металла, образовавшиеся при прокате исходных листов. Принципиальных отличий в структуре в двух перпендикулярных сечениях (сечение 1 и сечение 2) не выявлено.

Структура представлена ярко выраженной зернистой, равноосной α -фазой. В местах соединения трех и более зерен наблюдается незначительное присутствие β -фазы.

Размер зерна в такой структуре в среднем равен 15...25 мкм, при этом наибольший размер α -зерна достигает 30 мкм.

При проведении экспериментов по изготовлению конструкций методом сверхпластического деформирования следует учитывать следующие факторы:

1) перед формовкой того или иного титанового сплава следует уточнять температуру как полиморфного $\alpha \rightarrow \beta$ превращения, так и температуру рекристаллизации сплава. Относительно этих интервалов корректируется весь цикл термомеханической обработки материала;

2) температура полиморфного превращения (T_{mn}) для определенной марки сплава лежит в определенном диапазоне. И при варьировании химического состава сплава в пределах марки T_{mn} изменяется. Поэтому T_{mn} необходимо определять для каждой используемой плавки;

3) нельзя допускать перегрев материала выше температуры T_{mn} . Это связано со значительным ростом зерна, который происходит в результате того,

что образование β -зерна происходит совместно с объединением большого количества α -зерен. Структура после перегрева игольчатая, с пластинчатыми включениями. Последующая термическая обработка не позволяет вернуть материал в состояние равноосной мелкозернистой структуры. Такой эффект может быть получен только в результате деформационной обработки;

4) при охлаждении с высоких температур необходимо не допустить образование по границам β -зерен β -оторочки, которая значительно снижает механические свойства материала.

4.8 Выводы

По проведению опытных работ получены следующие результаты:

1) определены параметры сверхпластичности титановых сплавов в результате испытаний на двухосное растяжение;

2) разработаны рекомендации по выбору конструктивно-геометрических параметров клиновидных панелей (шага, высоты и длины ребер) с продольным и поперечным набором, для обеспечения заданной степени деформации в ребрах заполнителя. Переменный шаг ребер позволяет изготавливать панели с заданным распределением толщины заполнителя, в том числе и постоянной толщины;

3) изготовлена гипотетическая клиновидная трехслойная панель из титанового сплава ОТ4-1 с поперечными ребрами равной толщины. Переменный шаг ребер был рассчитан по разработанным рекомендациям по выбору конструктивно-геометрических параметров панелей. Установлено, что полученная толщина ребер панели изменяется в пределах 10%;

4) разработан алгоритм выбора способа формовки трехслойных клиновидных конструкций в зависимости от их конструктивно-геометрических параметров;

5) представлены требования к разработке оборудования и технологического оснащения для изготовления конструкций методом пневмотермической формовки и диффузионной сварки;

6) спроектирован и изготовлен блок с двумя рабочими полостями для формовки сложных конструкций и многослойных панелей, на прессе сверхпластичного формования и диффузионной сварки «FSP60T»;

7) проведены металлографические исследования, свидетельствующие о незначительном изменении микроструктуры и сохранении механических свойств титановых сплавов после пневмотермической формовки и диффузионной сварки.

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. Отклонение от расчётного графика формовки ведет к выходу из режима сверхпластической деформации и разрушению заполнителя, либо к недоформовке панели.

2) Установлены причины возникновения утяжин при пневмотермической формовке панелей, которые недопустимы на аэродинамических поверхностях конструкций летательных аппаратов. Разработана методика определения 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 панели, с применением подвижной плиты, перемещающейся механическим путем, либо управляемой противодавлением. Получены зависимости по определению параметров формовки клиновидных панелей с применением подвижной плиты для каждого способа. Предпочтение следует отдавать перемещению подвижной плиты с помощью противодавления, так как в этом случае упрощается конструкция оснастки.

4) Наиболее рациональным является изготовление клиновидных панелей с переменным шагом ребер заполнителя, обеспечивающим постоянство относительной высоты и позволяющим изготавливать панели с постоянной толщиной заполнителя. Постоянство относительной высоты ребер панели обеспечивает идентичность графика формовки для каждого ребра панели в режиме СП.

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

6) Предложены расчётные зависимости для определения параметров ребер заполнителя (высоты, длины и шага ребра) для изготовления панелей с заданной степенью деформации заполнителя, что после процесса формовки 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 пневмотермической формовки и диффузионной сварки, что обеспечивает неизменность механических свойств титановых сплавов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

СП – сверхпластичность;

СПФ - сверхпластическая формовка (формовка в режиме СП);

ПТФ – пневмотермическая формовка (пневмоформовка в режиме СП);

ДС – диффузионная сварка;

ПТФ/ДС – совмещённый процесс диффузионной сварки и пневмотермической формовки;

ПК – программный комплекс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астанин В.В., Валиев Р.З., Бердин В.К. К вопросу о взаимодействии механизмов сверхпластической деформации // Тезисы докладов I Всесоюзной научно-технической конференции "Сверхпластичность металлов", Уфа, УАИ, 1978.
2. Астанин В.В., Кайбышев О.А., Пшеничнюк, А.И. К теории сверхпластической деформации // Физика металлов и металловедение 1997, Т.84, вып.6. с.515.
3. Базык А.С., Тихонов А.С. Применение эффекта сверхпластичности в современной металлообработке. М: НИИМАШ, 1977.- с.64.
4. Барнс Э.Д., Смирнов О.М. Технология сверхпластической формовки полых изделий из листовых заготовок алюминиевых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство, 1995. - №5: с.9–12.
5. Бирюков Н.М., Смирнов В.А. Формообразование многослойных титановых панелей в состоянии сверхпластичности// ИВУЗ Авиационная техника, 1988, № 3, с.38-42.
6. Бочвар А.А. Изв. АН СССР. ОТН, 1946, №5, с.743-752.
7. Бочвар А.А., Свидерская З.А. Явление сверхпластичности сплава Zn - Al // Известия АН СССР. ОТН, 1945. - № 9. - С. 649-653.
8. Бочвар А.А. О разных механизмах пластичности в металлических системах // Изв. АН СССР. ОТН, 1948. - № 5. - С.649-653.
9. Бэкоффен В. Процессы деформации. М: Металлургия, 1977.- 288 с.
10. Васин Р.А., Еникеев Ф.У. Введение в механику сверхпластичности: В.2ч. Уфа: Гилем, 1999. Ч.II. Книга 1. – 460с.
11. Гош А.К. Определение сверхпластичности металлов/ Сверхпластическая формовка конструкционных материалов / Под. ред. Н. Пейнтон, К. Гамильтона / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1985. с. 89-106.

12. Грабский М.В. Структурная сверхпластичность металлов, М.: «Металлургия», 1975, 272 с.
13. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки материалов давлением. М.: Metallurgy, 1983. – 52с.
14. Джифкинс Р.С. Механизмы сверхпластической деформации // Сверхпластическая формовка конструкционных сплавов / Под ред. Н. Пейтона, К. Гамильтона / Пер. с англ. М.: Metallurgy, 1985, с. 11-36.
15. Ершов В.И., Ливенко Н.Д., Архангельская Л.В. Формовка тонкостенных днищ // Кузнечно-штамповочное производство. 1988. №2.
16. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. М.: Машгиз. 1962. – 327с.
17. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов. - М.: Metallurgy, 1975. - 279 с.
18. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. - М.: Metallurgy, 1984. - 264 с.
19. Кайбышев О.А. Изготовление многослойных конструкций из листовых титановых сплавов методом совмещения сверхпластической формовки и сварки давлением / О.А. Кайбышев, Р.Я. Лутфуллин, В.К. Бердин, А.А. Круглов, Р.В. Сафиуллин // Авиационная промышленность. 1991. №7. С.30-32.
20. Кайбышев О.А. Сверхпластическая формовка многослойных конструкций / О.А. Кайбышев, А.А. Круглов, А.Р. Таюпов, В.К. Бердин, Р.Я. Лутфуллин // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. №9. С.20-21.
21. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. - М.: Наука, 1969. - 420с.
22. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. - М.: Metallurgy, 1986. - 688 с.
23. Лункин А.В., Чупраков Д.А. Новые технологические процессы изготовления многослойных листовых конструкций летательных аппаратов // XXIII Гагаринские чтения. Сборник тезисов докладов -

- Всероссийская молодежная научная конференция 8-12 апреля 1997 г. - Москва: МАТИ. - С. 33.
24. Мазурский М.И., Еникеев Ф.У. К вопросу определения оптимальных условий сверхпластической формовки // Изв. РАН. Металлы, 1998, №4. - с. 65-71.
 25. Малинин Н.Н., Романов К.И., Ханин А.И. Теоретическое исследование газостатической формовки полых тонкостенных изделий. М.: Машиностроение. - 1985. - № 25. - С. 123-144.
 26. Малинин Н.Н. Технологические задачи теории пластичности и ползучести. - М.: Высшая школа, 1979. - 119 с.
 27. Математическое моделирование пластической деформации / Л.Е. Попов, Л.Я. Пудан, С.Н. Колупаева и др. Томск. Изд-во Том. ун-та, 1990. – 184с.
 28. Новиков И.И., Портной В.К. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном. - М.: Металлургия, 1981. - 168 с.
 29. Новиков И.И., Портной В.К., Ефремов Б.Н., Цепин М.А. Сверхпластическая формовка в производстве товаров народного потребления. Цветные металлы, № 8, 1984. - С. 78-82.
 30. Орехов А.В. Формовка-сварка трёхслойных днищ в состоянии сверхпластичности / А.В. Орехов, А.Г. Пашкевич, В.И. Михеев, Ю.Н. Казначеев, А.Е. Волхонский // ИВУЗ Авиационная техника, 1990, № 4, с.
 31. Орехов А.В. Формовка-сварка трёхслойных кольцевых обечаек в состоянии сверхпластичности / А.В. Орехов, А.Г. Пашкевич, А.В. Самичев, А.Е. Волхонский // ИВУЗ Авиационная техника, 1989, № 2, с.51-54.
 32. Орехов А.В., Пашкевич А.Г., Волхонский А.Е. Реверсивная пневмотермическая формовка куполообразных деталей с равномерной толщиной стенки // ИВУЗ Авиационная техника, 1990, № 2, с.109-112.
 33. Основы авиа- и ракетостроения: учеб. пособие для вузов / А.С. Чумадин, В.И. Ершов, К.А. Макаров и др. - М.: Инфра - М, 2008. - 992 е.; ил.

34. Охрименко Я.М., Горбунов В.С., Смирнов О.М. Пневмотермическая формовка металлов в условиях сверхпластичности // Вестник машиностроения, 1972.
35. Панченко Е.В. Определение параметров уравнения сверхпластического состояния листовых материалов из опыта на двухосное растяжение // Проблемы прочности, 1978, №8, с.31–35.
36. Панченко Е.В., Ренне И.П. Расчет давления формующей среды и времени формовки деталей в режиме сверхпластичности // Вестник машиностроения. - № 5. Москва, 1980. - с. 66-70.
37. Пат. США №3011602, Ensrud A. F., Ochiano L.M., Panel construction, 1961.
38. Пашкевич А.Г., Архангельская Л.В. Пневмотермическая формовка листовых деталей в состоянии сверхпластичности // Кузнечно-штамповочное производство, 1987, №8.
39. Пашкевич А.Г., Архангельская Л.В. Разностенность куполообразных деталей при пневмотермической формовке // ИВУЗ. Машиностроение. 1983. №3.
40. Пашкевич А.Г., Кондратьев М.В. и др. Пневмотермическая формовка ячеистых панелей в режиме сверхпластичности // Кузнечно-штамповочное производство, 1980, №5.
41. Пашкевич А.Г., Орехов А.В., Кондратьев М.В. Пневмотермическая формовка ячеистых конструкций // Авиационная промышленность, 1981.
42. Пашкевич А.Г., Орехов А.В., Половцев В.А. Формовка рифтов жесткости в состоянии сверхпластичности // ИВУЗ Авиационная техника, 1981.
43. Пашкевич А.Г., Орехов А.В., Смирнов В.А. Формовка-сварка трёхслойных титановых конструкций в состоянии сверхпластичности // ИВУЗ Авиационная техника, 1985, № 4, с 90-93.
44. Пашкевич А.Г., Орехов А.В., Тюпич Ю.П. Управление распределением толщины при пневмотермической формовке листовых деталей в режиме сверхпластичности // Кузнечно-штамповочное производство, 1978; №8.

45. Пашкевич А.Г., Шумаков С.Г., Шенаев М.О. Сверхпластическая формовка деталей сложных форм из труднодеформируемых сплавов. М.: «МАТИ» - РГТУ им. К.Э.Циолковского.
46. Поляк С.М., Соломатин В.С., Цепин М.А., Анищенко А.С. Пневмоформовка листовых материалов в состоянии сверхпластичности, М.: ЦНТИ «Поиск», 1981.
47. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. - М.: Машиностроение, 1968.- 283с.
48. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. - М.: Машиностроение, 1977.- 278с.
49. Пресняков А.А. Сверхпластичность металлов и сплавов, Алма-Ата, Наука, 1969.- 203с.
50. Прагер В. Введение в механику сплошных сред. Пер. с англ., М., ИЛ. 1963. 311 с.
51. Разностенность куполообразных деталей при пневмотермической формовке / Пашкевич А.Г., Орехов А.В., Архангельская Л.В. и др. // Изв. вузов. Машиностроение, 1983. - № 3. - С. 136-139.
52. Сверхпластичность металлических материалов / Шоршоров М.Х., Тихонов А.С., Булат С.И. и др. -М., Metallurgia, 1973. - 217 с.
53. Сверхпластическая формовка конструкционных сплавов / Под ред. Н.Е.Пейтона и К.Х.Гамильтона. - М.: Metallurgia, 1985. - 312 с.
54. Смирнов В.А. Формовка-сварка многослойных титановых конструкций в состоянии сверхпластичности без матрицы / В.А. Смирнов, Н.М. Бирюков, В.В. Садков, И.Г. Ростковский // Авиационная промышленность, 1986, №9, с. 46-48.
55. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. - М.: Машиностроение, 1979. - 184 с.
56. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением. - М.: Metallurgia, 1973. - 496 с.

57. Смирнов О.М. Достижения и перспективы использования сверхпластичности в обработке материалов давлением // Кузнечно-штамповочное производство. 1994. - № 4. - С. 2-5.
58. Смирнов О.М. Сверхпластичность материалов: от реологии к технологии // Кузнечно-штамповочное производство. 1998. - № 2. - С. 18-23.
59. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1977. - 423 с.
60. Строганов Г.Б., Новиков И.И., Бойцов В.В., Пширков В.Ф. Использование сверхпластичности в обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 1989. 108с.
61. Строганов Г.Б., Новиков И.И., Пширков В.Ф. Сплавы для сверхпластического формообразования деталей авиационной техники. М.: Машиностроение, 1984, с.73.
62. Теория обработки металлов давлением. / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др. - М.: Металлургия, 1963. - 672с.
63. Технологические решения и процессы сверхпластичного формообразования и диффузионной сварки. - Обзор / Д.А. Семенов, В.Н. Чудин, О.В. Егоров, Я.А. Соболев и др. - М.: Изд-во ЦНТИ "Поиск", 1986. - 65с.
64. Тихонов А.С. Эффект сверхпластичности металлов и сплавов. - М.: Наука, 1978.- 142с.
65. Формовка полых изделий из листа в состоянии сверхпластичности / Я.М. Охрименко, О.М. Смирнов, В.С. Горбунов, М.А. Цепин. - М.: Машиностроение, 1976. -38 с.
66. Ходырев В.А. Проектирование, изготовление и эксплуатация штампов с полиуретаном. Пермь: Книжное из-во, 1975. - 365с.
67. Чудин В.Н. Изготовление листовых радиаторов формообразованием диффузионной сваркой - пайкой // Сварочное производство. 1996. - № 12.-С. 4-6.

68. Чудин В.Н. Процессы формообразования при ползучести и сверхпластичности // Кузнечно-штамповочное производство, 1997. - № 7. - С. 20-23.
69. Чудин В.Н. Изготовление радиаторов совмещенным методом формообразования и сварки давлением / В.Н. Чудин, Е.Н. Сидоренков, С.А. Сумароков, С.С. Яковлев // Кузнечно-штамповочное производство. - 1995. - №11. -С. 11-12.
70. Чудин В.Н. Изготовление многослойных конструкций методом сверхпластического формообразования и сварки давлением / В.Н. Чудин, Е.Н. Сидоренков, А.П. Тихонов, В.С. Дмитриев // Кузнечно-штамповочное производство. - 1992.-№7.-С. 14-15.
71. Чумаченко Е.Н. Математическое моделирование формоизменения оболочек в условиях сверхпластичности. Учебное пособие. - Моск. гос. институт электроники и математики. - М., 1999. - 158 с.
72. Чумаченко Е.Н. Моделирование процессов сверхпластической формовки с учетом структурных изменений в металле / Е.Н. Чумаченко, М.А. Цепин, С.Е. Чумаченко, А.В. Чекин // Научно-технологические проблемы машиностроения. 2001. - № 1. - С. 38-48.
73. Чумаченко Е.Н. Сверхпластическая формовка титановых оболочек в широком диапазоне температур / Е.Н. Чумаченко, В.К. Портной, С.А. Аксенов, Д.С. Рылов // Наука производству, 2003. - №12. - С. 2-6.
74. Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Цепин М.А. Сверхпластичность: материалы, теория, технологии. - М.: КомКнига, 2005. - 320 с.
75. Яковлев С.П., Чудин В.Н., Яковлев С.С. Изотермическая штамповка трапецевидных элементов трехслойных листовых конструкций из анизотропного материала//Кузнечно-штамповочное производство. 1996. - № 8. - С. 6-9.
76. Яковлев С.П., Чудин В.Н., Яковлев С.С. Изотермическая штамповка трапецевидных элементов трехслойных листовых конструкций из

- анизотропного материала//Кузнечно-штамповочное производство. 1996. - № 8. - С. 6-9.
77. Яковлев С.П., Чудин В.Н., Яковлев С.С., Соболев Я.А. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов. - М., Тула: Машиностроение-1; изд-во ТулГУ, 2003. - 427 с.
78. Яковлев С.С. Изотермическая пневмоформовка элементов ячеистых многослойных листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропного материала. Заготовительные производства в машиностроении. М.: Машиностроение. 2006. №8.
79. ACB Aerospace Metal Solutions // Press & Machines / Superplastic forming presses: [сайт]. URL: <http://www.acb-ps.com/superplastic-forming-presses.html> (дата обращения: 27.05.2014);
80. Accudyne Engineering & Equipment Company // Super Plastic Forming: [сайт]. URL: <http://www.accudyneeng.com/presses/super-plastic-forming.html> (дата обращения: 27.05.2014);
81. Agrawal. Superplastic Forming. American Society for Metals, 1984. DIA 333-85-01-00.
82. Alfredo R. del Mundo, Fred T. Me Quilkin, Rene' R. Rivas NASA Contractor Report 163114, SPF/DB Primary Structure For Supersonic Aircraft (T-38 Horizontal Stabilizer), ROCKWELL INTERNATIONAL CORPORATION, Los Angeles, California 90009, 1981.
83. Ascani L., Lackman L., Design to Cost with Advanced Composites and Metals, Aircraft, 1979, v.16, №10, p. 714-719.
84. Avery D.H., Backofen W.A. A structural basis for superplasticity. Transaction of the ASM, v.58,1965. - P. 551-562.
85. Baldo O., Diaz J., Martinez F. et.al. Numerical Simulation of SPF/DB Processes // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995. P. 218-234.

86. Biba N.V., Lishnij A.I., Sadykhov O.V., Stiebounov S.A. Design and Analysis of SPF Technology with FORM-2D Sistem // Materials Science Forum. 1994. VI70-172. P. 687-692.
87. Bartle P.M. Diffusion Bonding: a look at the future // Weld. - 11. - 1975.-P. 799-804.
88. Backofen W.A., Turner I.R., Avery D.H. Superplasticity in an Al-Zn alloys. Trans ASM 1964; 57: P. 980-990.
89. Chumachenko E.N., Smirnov O.M. Computer Aided Design of SPF Processes Based on the SPLEN Program Set // Materials Science Forum. 1994. V170-172. P. 601-606.
90. Collier A.D., Jackson N. Industrialization of SPF within Bae Military Aircraft // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995. P. 377-383.
91. Cornfield G.C. and Johnson R.H. The forming of superplastic sheet metal // Int. J. Mesh. Science, 1970, № 12, p. 479-490.
92. Corporate overview SAVAGE Hydraulic press // Hot press: [сайт]. URL: http://www.savagepress.com/hot_press/hot_press.htm (дата обращения: 27.05.2014);
93. Daniel G. Sanders and Mamidala Ramulu, Examination of Superplastic Forming Combined with Diffusion Bonding for Titanium: Perspective from Experience, 2004.
94. D. Holt, An analysis of the bulging of superplastic sheet by lateral pressure. Internanat. J. mec.sci., 1970, vol.12.
95. Dressei C.F. Application of SPF/DB Titanium Technology to Large Commercial aircraft // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995. P. 359-376.
96. Ducommun Incorporated // Capabilities: [сайт]. URL: <http://www.ducommun.com/das/parsonsCapabilities.aspx> (дата обращения: 27.05.2014);

97. E.D. Weisert, G.W. Stacher, Fabrication Titanium Part with SPF/DB Process, Metal Progress, 1977, March, 3.
98. Enikeev F.U. and Kruglov A.A. An analysis of superplastic forming of circular diaphragm // Int.J.Mesh.Science. 1995. V.37, №5. P.473-483.
99. Form tech // SPF/DB – Sandwich Part: [сайт]. URL: <http://www.formtech.de/en/en-spfdb.htm> (дата обращения: 27.05.2014);
100. Fitzpatrick G.A. The Exploitation of Superplasticity for Rolls-Royces Wide Chord Fan Blsde // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995. P. 347-350.
101. Ghosh A.K. and Hamilton C.H. Superplastic Forming of Long Restangular Box Section Analysis and Experiments. Proc. ASM Conference on Process Modeling, 1978. - P. 303-331.
102. Hamilton C.H., Chosh A.K., Wert J.A. Superplasticity in engineering alloys: a review // Metals Forum. - 1985.- V.8. -N 4. - P. 172-190.
103. Hamilton C.H., Ascani L.A., Method for making metallic sandwich structures, Пат. США №3920117, 1975.
104. Hamilton C.H., Ascani L.A., Method for making metallic sandwich structures, Пат. США №3927817, 1975.
105. Hamilton C.H., Ascani L.A. Method for Superplastic forming of metals with concurrent diffusion bonding, Пат. США №3920175, 1975.
106. Interavia 1979; 5: 3: 207-214.
107. Jovane F. An approximate analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm. Intern. // J. Mech. Set., 1968. - N10. - P. 423-427.
108. Kahandal R., Yasui K. Recent Advancements in SPF/DB Technology // Materials Science Forum. 1997. V. 243-245. P. 687-694.
109. Kruglov A.A., Lutfullin R.Y., Kaibyshev O.A. Simulation of superplastic forming of spherical vessel using the finite element method / Ed. By J.L. Chennot, R.D.Wood, O.C. Zienkiewicz // Proceed 4th Int. Conf. on number method in industrial forming processes (Numiform 92) Valbonne. France (14-18 September 1992), 1992. P. 857-860.

110. L.A. Ascani, I.K. Pully. New Advancements in Titanium Technology and their Cost and Weight Benefits. Proceeding of the SCAR Conference, Part I and II, USA, Langely Research Center, Hampton, Virginia, 1976, Nov. 9-12, 757-782.
111. Lee D., Backafen W.A. Superplasticity in some titanium and zirconium alloys. Trans. Met. Soc. AIME. 1967: 239; 1034–1040.
112. Palz C., Messier R.W. Design and Fabrication of Advanced Titanium Structures “AIAA/ASME/ASCE/AHC 20-th Struct., Struct. Dyn., and Mater. Conf. St. Louis, Ma, 1979” S.I., 1979, p. 208-220.
113. Shang B., Mao W., Li Z. Superplastic Forming of Ti-Al Alloy and its Application in Aerospace // Materials Science Forum. 1997. V. 243-245. P. 775-782.
114. Swale W. Superplastic Forming of Large Ti-6Al-4V and Turbo Prop. Nacelle Products // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995. P. 351-358.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программа расчёта параметров формовки клиновидных трёхслойных панелей на этапе свободной формовки заполнителя на языке программирования «Ассемблер»:

```
.386
.model flat,stdcall
option casemap:none
include windows.inc
include user32.inc
include kernel32.inc
include shell32.inc
include comctl32.inc
include comdlg32.inc
include fpu.inc
includelib user32.lib
includelib kernel32.lib
includelib shell32.lib
includelib comctl32.lib
includelib comdlg32.lib
includelib fpu.lib
;include alex_diser.inc
WinMain                                PROTO :DWORD,;DWORD,;DWORD,;DWORD
WndProc                                PROTO :DWORD,;DWORD,;DWORD,;DWORD
IDD_DIALOG                            equ 1000
mat_struct struc
    _name db 50 dup(?)
    tE dt ?
    bE db 50 dup(?)
    tSigma dt ?
    bSigma db 50 dup(?)
mat_struct ends
.const
ClassName db 'DLGCLASS',0
AppName db 'Formovka proga',0
sFormatResult db 'Толщина заполнителя(мм);Давление формовки(Па);Время
формовки(с)',0Dh,0Ah;65
sFileFilter db '*.csv',0
sDefExt db '.csv',0
```

```

sDialog          db 'Сохранение результатов расчета...',0
;---
sParam1         db 'Исходная толщина заполнителя (мм);';35
sParam3         db 'Шаг заполнителя (мм);';22
sParam4         db 'Максимальная высота панели (мм);';33
sParam6         db 'Ширина зоны дифф. сварки (мм);';26
sParam7         db 'Количество расчетных шагов;';28
sMat            db 'Материал;';10
sDef            db 'Скорость деформации (с-1);';27
sNap           db 'Напряжение течения (Па);';25
.data
;-----
nname  db "name",0
ne_    db "e",0
nSigma db "sigma",0
;Исходная толщина листа заполнителя Sz
tSlistazapol      dt 0
bSlistazapol      db 50 dup(0)
;Шаг заполнителя a
tShagZapolA       dt 0
bShagZapolA       db 50 dup(0)
;Максимальная высота панели Hmax
tHmax             dt 0
bHmax             db 50 dup(0)
;ширина зоны дифф сварки
tShirDiff         dt 0
bShirDiff         db 50 dup(0)
;Количество расчетных шагов i
i                dd 10
bi              db 50 dup(0)
;Дельта H
tDeltaH          dt 0
;Указатель на массив высот панели на каждом шаге будет равен (i*sizeof dt)
pHshag          dd 0
;Указатель на массив относительных высот панели deltaH/a дельта высоты на шаг заполнителя
pHotnosit       dd 0
;Указатель на массив толщины заполнителя
pSzapol         dd 0
;Указатель на массив давлений
pPress          dd 0
;Указатель на массив структур материала

```

```

pmat_struct dd 0
;Указатель на массив времен
pTime      dd 0
tmp        dt 0
tmp12      dd 0
ini        db 250 dup(0)
abc db "0123456789"
.data?
hInstance      dd ?
CommandLine    dd ?
hWnd           dd ?
pMemo          dd ?
;handless
hComboBox      dd ?
hMemo          dd ?
hB1            dd ?
hB2            dd ?
hE1            dd ?
hE3            dd ?
hE4            dd ?
hE6            dd ?
hE7            dd ?
hS1            dd ?
hS2            dd ?
textBuff db 12 dup(?)
sOP OPENFILENAME <?>
nam_ db 255 dup (?)
.code
str2int proc
;В ECX количество символов(начиная с 1)
;в EBX адрес строки
;Из EAX - значение
;Из ECX - если <(0) то произошла ошибка.
        xor eax,eax
loop1:
        xor edx,edx
        cmp ecx,edx
        je exit1
        mov dl,[ebx]
        and dl,0Fh
        add eax,edx

```

```

inc ebx
dec ecx
jz exit1
imul eax,eax,10
jnc loop1
exit1:
ret
str2int endp
int2str2 proc; Приводит содержимое EAX в строку (без знака) в
;ECX возвращает смещение, по которому лежит начало строки
pusha
invoke RtlZeroMemory,ADDR textBuff,12
popa
push eax
push esi
mov ecx,10
mov esi,ecx
loop1:
xor edx,edx
div ecx
lea ebx,[textBuff+esi-1]
cmp edx,0;
jne neee
cmp eax,0
je exx1
neee:
dec esi
lea edx,[abc+edx]
mov dh ,[edx]
mov [ebx],dh
jmp loop1
exx1:
mov ecx,esi
mov edx,12
sub edx,ecx
lea ecx,[textBuff+esi]
pop esi
pop eax
ret
int2str2 endp
GetIniPath proc

```

```

LOCAL str_size,pos_slash,q:DWORD
xor ecx,ecx
xor ebx,ebx
mov edx,CommandLine
loop_get_pos:
    xor eax,eax
    mov al,[edx+ecx]
    cmp eax,'\ '
    jne noo
        mov pos_slash,ecx
        add ebx,1
    noo:
    cmp eax, ""
    jne noo1
    test ebx,ebx
    jnz noo1
        mov q,ecx
        add q,edx
        inc q
    noo1:
    inc ecx
test eax,eax
jne loop_get_pos
mov str_size,ecx
invoke RtlZeroMemory,ADDR ini,250
invoke RtlMoveMemory,ADDR ini,q,str_size
mov ebx,offset ini
add ebx,pos_slash
sub ebx,1
mov [ebx+1],dword ptr 'tset'
mov [ebx+5],dword ptr 'ini.'
mov [ebx+9],dword ptr 0
ret
GetIniPath endp
GetMatFromIni proc
LOCAL count,pdata,bSect,pMat:DWORD
xor eax,eax
mov ecx,eax
mov count,eax
loop_mm:
    mov eax,count

```

```

inc eax
invoke int2str2
mov bSect,ecx
mov eax,count
imul eax,eax,sizeof mat_struct
mov ebx,pmat_struct
add ebx,eax
mov pMat,ebx
lea ebx,(mat_struct ptr [ebx])._name
invoke GetPrivateProfileString,ecx,ADDR nname,0,ebx,50,ADDR ini
test eax,eax
je ex_mm
mov ebx,pMat
lea ebx,(mat_struct ptr [ebx]).bE
invoke GetPrivateProfileString,bSect,ADDR ne_,0,ebx,50,ADDR ini
mov ebx,pMat
lea ebx,(mat_struct ptr [ebx]).bSigma
invoke GetPrivateProfileString,bSect,ADDR nSigma,0,ebx,50,ADDR ini
mov ebx,pMat
lea edx,(mat_struct ptr [ebx]).tE
lea ebx,(mat_struct ptr [ebx]).bE
invoke FpuAtoFL,ebx,edx,DEST_MEM
mov ebx,pMat
lea edx,(mat_struct ptr [ebx]).tSigma
lea ebx,(mat_struct ptr [ebx]).bSigma
invoke FpuAtoFL,ebx,edx,DEST_MEM

inc count
jmp loop_mm
ex_mm:
ret

```

GetMatFromIni endp

InitVars proc

LOCAL dsize:DWORD

```

;инициализация массивов
mov eax,i
imul eax,eax,sizeof tDeltaH
mov dsize,eax
invoke VirtualAlloc,0,eax,MEM_COMMIT,PAGE_READWRITE
mov pHshag,eax
invoke RtlZeroMemory,eax,dsize
invoke VirtualAlloc,0,dsize,MEM_COMMIT,PAGE_READWRITE

```

```

mov pHotnosit,eax
invoke RtlZeroMemory,eax,dsize
invoke VirtualAlloc,0,dsize,MEM_COMMIT,PAGE_READWRITE
mov pSzapol,eax
invoke RtlZeroMemory,eax,dsize
invoke VirtualAlloc,0,dsize,MEM_COMMIT,PAGE_READWRITE
mov pPress,eax
invoke RtlZeroMemory,eax,dsize
invoke VirtualAlloc,0,dsize,MEM_COMMIT,PAGE_READWRITE
mov pTime,eax
invoke RtlZeroMemory,eax,dsize
invoke VirtualAlloc,0,1024*1024*10,MEM_COMMIT,PAGE_READWRITE
mov pMemo,eax
ret

```

InitVars endp

DestroyVars proc

LOCAL dsize:DWORD

;Удаление массивов

```

mov eax,i
imul eax,eax,sizeof tDeltaH
invoke VirtualFree,pHshag,eax,MEM_DECOMMIT
invoke VirtualFree,pHotnosit,dsize,MEM_DECOMMIT
invoke VirtualFree,pSzapol,dsize,MEM_DECOMMIT
invoke VirtualFree,pPress,dsize,MEM_DECOMMIT
invoke VirtualFree,pTime,dsize,MEM_DECOMMIT
invoke VirtualFree,pMemo,1024*1024*1024,MEM_DECOMMIT
ret

```

DestroyVars endp

CalcDeltaH proc;Высчитываем дельта Н

```

invoke FpuDiv, ADDR tHmax, i,ADDR tDeltaH, SRC1_REAL or SRC2_DIMM or DEST_MEM
ret

```

CalcDeltaH endp

CalcHshag proc;Высчитываем высоту панели на каждом шаге

```

xor edx,edx
xor eax,eax
mov eax,pHshag
xor ecx,ecx
mov ecx,i
inc ecx
inc edx
loop_hs:

```

```

        push eax
        push edx
        push ecx
        invoke FpuMul,edx,ADDR tDeltaH,eax,SRC1_DIMM or SRC2_REAL or DEST_MEM
        pop ecx
        pop edx
        pop eax
        add eax,sizeof tDeltaH

    inc edx
    cmp edx,ecx
    jne loop_hs
    ret
CalcHshag endp
CalcHotnosit proc;Высчитываем относительную высоту панели
    xor edx,edx
    xor eax,eax
    mov eax,pHshag
    xor ebx,ebx
    mov ebx,pHotnosit
    xor ecx,ecx
    mov ecx,i
    inc ecx
    inc edx
loop_ho:
    push ebx
    push eax
    push edx
    push ecx
    invoke FpuDiv,eax,ADDR tShagZapolA,ebx,SRC1_REAL or SRC2_REAL or
DEST_MEM
    pop ecx
    pop edx
    pop eax
    pop ebx
    add eax,sizeof tDeltaH
    add ebx,sizeof tDeltaH

    inc edx
    cmp edx,ecx
    jne loop_ho
    ret
CalcHotnosit endp

```


CalcPzapol proc;Высчитываем толщину заполнителя

```

xor edx,edx
xor eax,eax
mov eax,pHotnosit;in
xor ebx,ebx
mov ebx,pSzapol;out
xor ecx,ecx
mov ecx,i
inc ecx
inc edx
loop_sz:
    push eax
    push edx
    push ecx
    push ebx
    invoke FpuXexpY,eax,2,0,SRC1_REAL or SRC2_DIMM or DEST_FPU;посчитали
квadrat Нотносительной
    invoke FpuAdd,0,1,0,SRC1_FPU or SRC2_DIMM or DEST_FPU;Добаыили единицу к
предидущему результату
    invoke FpuSqrt,0,0,SRC1_FPU or DEST_FPU;Взяли корень из предыдущего
    invoke FpuDiv,ADDR tSlistazapol,0,0,SRC1_REAL or SRC2_FPU or
DEST_FPU;DEST_MEM;Поделили Szapol на результат предидущий получили толщину заполнителя
    pop ebx
    push ebx
    invoke FpuMul,0,ADDR tSlistazapol,ebx,SRC1_FPU or SRC2_REAL or DEST_MEM
    pop ebx
    pop ecx
    pop edx
    pop eax
    add eax,sizeof tDeltaH
    add ebx,sizeof tDeltaH

inc edx
cmp edx,ecx
jne loop_sz
ret

```

CalcPzapol endp

CalcPress proc pmat1:DWORD;Высчитываем давление формовки

```

xor edx,edx
xor eax,eax
mov eax,pHotnosit
xor ebx,ebx
mov ebx,pPress

```

```

xor ecx,ecx
mov ecx,i
inc ecx
inc edx
loop_p:
    push eax
    push edx
    push ecx
    push ebx
    invoke FpuXexpY,eax,2,0,SRC1_REAL or SRC2_DIMM or DEST_FPU;посчитали
квadrat Нотносительной
    invoke FpuAdd,0,1,0,SRC1_FPU or SRC2_DIMM or DEST_FPU
    mov eax,[esp+4*3];
    invoke FpuDiv,eax,0,ADDR tmp,SRC1_REAL or SRC2_FPU or DEST_MEM
    invoke FpuAdd,ADDR tShirDiff,ADDR tShagZapola,0,SRC1_REAL or SRC2_REAL or
DEST_FPU
    invoke FpuDiv,ADDR tSlistazapol,0,0,SRC1_REAL or SRC2_FPU or DEST_FPU
    invoke FpuMul,0,ADDR tmp,ADDR tmp,SRC1_FPU or SRC2_REAL or DEST_MEM
    invoke FpuSqrt,3,0,SRC1_DIMM or DEST_FPU
    invoke FpuDiv,2,0,0,SRC1_DIMM or SRC2_FPU or DEST_FPU
    mov eax,pmat1
    lea eax,(mat_struct ptr [eax]).tSigma
    invoke FpuMul,eax,0,0,SRC1_REAL or SRC2_FPU or DEST_FPU
    pop ebx
    push ebx
    invoke FpuMul,0,ADDR tmp,ebx,SRC1_FPU or SRC2_REAL or DEST_MEM
    pop ebx
    pop ecx
    pop edx
    pop eax
    add eax,sizeof tDeltaH
    add ebx,sizeof tDeltaH

inc edx
cmp edx,ecx
jne loop_p
ret

CalcPress endp
CalcTime proc pmat2:DWORD
    xor edx,edx
    xor eax,eax
    mov eax,pHotnosit
    xor ebx,ebx

```

```

mov ebx,pTime
xor ecx,ecx
mov ecx,i
inc ecx
inc edx
loop_t:
    push eax
    push edx
    push ecx
    push ebx
    invoke FpuXexpY,eax,2,0,SRC1_REAL or SRC2_DIMM or DEST_FPU;посчитали
квadrat Ногносительной
    mov eax,[esp+4*3];
    invoke FpuAdd,0,1,0,SRC1_FPU or SRC2_DIMM or DEST_FPU
    invoke FpuSqrt,0,0,SRC1_FPU or DEST_FPU
    invoke FpuLnх,0,ADDR tmp,SRC1_FPU or DEST_MEM
    invoke FpuSqrt,3,0,SRC1_DIMM or DEST_FPU
    mov eax,pmat2
    lea eax,(mat_struct ptr [eax]).tE
    invoke FpuMul,eax,0,0,SRC1_REAL or SRC2_FPU or DEST_FPU
    invoke FpuDiv,2,0,0,SRC1_DIMM or SRC2_FPU or DEST_FPU
    pop ebx
    push ebx
    invoke FpuMul,ADDR tmp,0,ebx,SRC1_REAL or SRC2_FPU or DEST_MEM
    pop ebx
    pop ecx
    pop edx
    pop eax
    add eax,sizeof tDeltaH
    add ebx,sizeof tDeltaH

inc edx
cmp edx,ecx
jne loop_t
ret

CalcTime endp
GetLastZer proc pp:DWORD
    mov ebx,pp
    xor eax,eax
    mov ecx,eax
    loop_z:
        mov al,[ebx+ecx]

```

```

        test eax,eax
        jnz nex
            add ebx,ecx

        jmp exx
    nex:
inc ecx
jmp loop_z
exx:
mov eax,ebx
ret
GetLastZer endp
FormatResult proc
LOCAL ii,PM:DWORD
    invoke RtlZeroMemory,pMemo,1024*1024*10
    xor ecx,ecx
    mov ii,ecx
    mov edx,pMemo
    mov PM,edx
loop_f:
    imul eax,ecx,sizeof tShagZapolA
    mov ebx,pSzapol
    add ebx,eax
    invoke FpuFLtoA,ebx,3,PM,SRC1_REAL or SRC2_DIMM or STR_SCI
    invoke GetLastZer,PM
    mov [eax],DWORD ptr' mm '
    add eax,4
    mov [eax],DWORD ptr' '
    add eax,4
    mov PM,eax
    mov ecx,ii
    imul eax,ecx,sizeof tShagZapolA
    mov ebx,pPress
    add ebx,eax
    invoke FpuFLtoA,ebx,2,PM,SRC1_REAL or SRC2_DIMM or STR_SCI
    invoke GetLastZer,PM
    mov [eax],DWORD ptr' aP '
    add eax,4
    mov [eax],DWORD ptr' '
    add eax,4
    mov PM,eax

```

```

        mov ecx,ii
        imul eax,ecx,sizeof tShagZapolA
        mov ebx,pTime
        add ebx,eax
        invoke FpuFLtoA,ebx,3,PM,SRC1_REAL or SRC2_DIMM or STR_REG
        invoke GetLastZer,PM
        mov [eax],DWORD ptr' s '
        add eax,4
        mov [eax],DWORD ptr' '
        add eax,4
        mov PM,eax

        mov PM,eax
        mov [eax],word ptr 0A0Dh
        add PM,2

    mov ecx,ii
    inc ii
    inc ecx
    cmp i,ecx
    jne loop_f
    ret
FormatResult endp
FormatExport proc
    LOCAL ii,PM:DWORD
    invoke RtlZeroMemory,pMemo,1024*1024*10
    invoke RtlMoveMemory,pMemo,ADDR sParam1,35
    mov edx,pMemo
    mov PM,edx
    add PM,35
    invoke FpuFLtoA,ADDR tSlistazapol,3,PM,SRC1_REAL or SRC2_DIMM or STR_REG
    invoke GetLastZer,PM
    mov [eax],WORD ptr 0A0Dh
    add eax,2
    mov PM,eax
    invoke RtlMoveMemory,PM,ADDR sParam3,22
    add PM,22
    invoke FpuFLtoA,ADDR tShagZapolA,3,PM,SRC1_REAL or SRC2_DIMM or STR_REG
    invoke GetLastZer,PM
    mov [eax],WORD ptr 0A0Dh
    add eax,2
    mov PM,eax

```

```
invoke RtlMoveMemory,PM,ADDR sParam4,33
add PM,33
invoke FpuFLtoA,ADDR tHmax,3,PM,SRC1_REAL or SRC2_DIMM or STR_REG
invoke GetLastZer,PM
mov [eax],WORD ptr 0A0Dh
add eax,2
mov PM,eax
invoke RtlMoveMemory,PM,ADDR sParam6,26
add PM,26
invoke FpuFLtoA,ADDR tShirDiff,3,PM,SRC1_REAL or SRC2_DIMM or STR_REG
invoke GetLastZer,PM
mov [eax],WORD ptr 0A0Dh
add eax,2
mov PM,eax
invoke RtlMoveMemory,PM,ADDR sParam7,28
add PM,28
mov eax,i
invoke int2str2
invoke RtlMoveMemory,PM,ecx,edx
invoke GetLastZer,PM
mov [eax],WORD ptr 0A0Dh
add eax,2
mov PM,eax
invoke RtlMoveMemory,PM,ADDR sMat,10
add PM,10
invoke SendMessage,hComboBox,CB_GETCURSEL,0,0
imul eax,eax,sizeof mat_struct
add eax,pmat_struct
invoke RtlMoveMemory,PM,eax,50
invoke GetLastZer,PM
mov [eax],WORD ptr 0A0Dh
add eax,2
mov PM,eax
invoke RtlMoveMemory,PM,ADDR sDef,27
add PM,27
invoke SendMessage,hComboBox,CB_GETCURSEL,0,0
imul eax,eax,sizeof mat_struct
add eax,pmat_struct
lea eax,(mat_struct ptr [eax]).bE
invoke RtlMoveMemory,PM,eax,50
invoke GetLastZer,PM
```

```

mov [eax],WORD ptr 0A0Dh
add eax,2
mov PM,eax
invoke RtlMoveMemory,PM,ADDR sNap,25
add PM,25
invoke SendMessage,hComboBox,CB_GETCURSEL,0,0
imul eax,eax,sizeof mat_struct
add eax,pmat_struct
lea eax,(mat_struct ptr [eax]).bSigma
invoke RtlMoveMemory,PM,eax,50
invoke GetLastZer,PM
mov [eax],WORD ptr 0A0Dh
add eax,2
mov PM,eax
invoke RtlMoveMemory,PM,ADDR sFormatResult,65
xor ecx,ecx
mov ii,ecx
add PM,65
loop_f:
    imul eax,ecx,sizeof tShagZapola
    mov ebx,pSzapol
    add ebx,eax
    invoke FpuFLtoA,ebx,3,PM,SRC1_REAL or SRC2_DIMM or STR_REG
    invoke GetLastZer,PM
    mov [eax],byte ptr ';'
    add eax,1
    mov PM,eax
    mov ecx,ii
    imul eax,ecx,sizeof tShagZapola
    mov ebx,pPress
    add ebx,eax
    invoke FpuFLtoA,ebx,2,PM,SRC1_REAL or SRC2_DIMM or STR_REG
    invoke GetLastZer,PM
    mov [eax],byte ptr ';'
    add eax,1
    mov PM,eax
    mov ecx,ii
    imul eax,ecx,sizeof tShagZapola
    mov ebx,pTime
    add ebx,eax
    invoke FpuFLtoA,ebx,3,PM,SRC1_REAL or SRC2_DIMM or STR_REG

```

```

        invoke GetLastZer,PM
        mov PM,eax
        mov [eax],word ptr 0A0Dh
        add PM,2
    mov ecx,ii
    inc ii
    inc ecx
    cmp i,ecx
    jne loop_f
    mov edx,PM
    sub edx,pMemo
    mov ebx,pMemo
    xor ecx,ecx
    xor eax,eax
loop_dot:
        mov al,[ebx+ecx]
        cmp al,' '
        jne nn12
                mov byte ptr[ebx+ecx],''
    nn12:
    inc ecx
    cmp ecx,edx
    jne loop_dot

    mov eax,PM
    sub eax,pMemo
    ret
FormatExport endp
;-----
start:
    invoke GetModuleHandle,NULL
    mov hInstance,eax
    invoke GetCommandLine
    invoke InitCommonControls
    mov CommandLine,eax
        mov eax,50
        imul eax,eax,sizeof mat_struct
        push eax
        invoke VirtualAlloc,0,eax,MEM_COMMIT,PAGE_READWRITE
        mov pmat_struct,eax
        pop ebx

```



```

        invoke RtlZeroMemory,eax,ebx
        invoke GetIniPath
        invoke GetMatFromIni
    invoke WinMain,hInstance,NULL,CommandLine,SW_SHOWDEFAULT
    invoke ExitProcess,eax
WinMain proc hInst:HINSTANCE,hPrevInst:HINSTANCE,CmdLine:LPSTR,CmdShow:DWORD
    LOCAL wc:WNDCLASSEX
    LOCAL msg:MSG
    mov     wc.cbSize,sizeof WNDCLASSEX
    mov     wc.style,CS_HREDRAW or CS_VREDRAW
    mov     wc.lpfWndProc,offset WndProc
    mov     wc.cbClsExtra,NULL
    mov     wc.cbWndExtra,DLGWINDOWEXTRA
    push   hInst
    pop     wc.hInstance
    mov     wc.hbrBackground,COLOR_BTNFACE+1
    mov     wc.lpszMenuName,0;IDM_MENU
    mov     wc.lpszClassName,offset ClassName
    invoke LoadIcon,NULL,IDI_APPLICATION
    mov     wc.hIcon,eax
    mov     wc.hIconSm,eax
    invoke LoadCursor,NULL,IDC_ARROW
    mov     wc.hCursor,eax
    invoke RegisterClassEx,addr wc
    invoke CreateDialogParam,hInstance,IDD_DIALOG,NULL,addr WndProc,NULL
    invoke ShowWindow,hWnd,SW_SHOWNORMAL
    invoke UpdateWindow,hWnd
    .while TRUE
        invoke GetMessage,addr msg,NULL,0,0
        .BREAK .if !eax
        invoke TranslateMessage,addr msg
        invoke DispatchMessage,addr msg
    .endw
    mov     eax,msg.wParam
    ret
WinMain endp
WndProc proc hWin:HWND,uMsg:UINT,wParam:WPARAM,lParam:LPARAM
    mov     eax,uMsg
    .if eax==WM_INITDIALOG
        push   hWin
        pop     hWnd
    
```

```
invoke GetDlgItem,hWin,1015
mov hComboBox,eax
invoke GetDlgItem,hWin,1023
mov hMemo,eax
invoke GetDlgItem,hWin,1021
mov hB1,eax
invoke GetDlgItem,hWin,1022
mov hB2,eax
invoke GetDlgItem,hWin,1008
mov hE1,eax
invoke GetDlgItem,hWin,1010
mov hE3,eax
invoke GetDlgItem,hWin,1011
mov hE4,eax
invoke GetDlgItem,hWin,1013
mov hE6,eax
invoke GetDlgItem,hWin,1014
mov hE7,eax
invoke GetDlgItem,hWin,1019
mov hS1,eax
invoke GetDlgItem,hWin,1020
mov hS2,eax
xor eax,eax
mov ecx,eax
mov ebx,pmat_struct
loop_combo:
    lea edx,(mat_struct ptr[ebx])._name
    push ebx
    invoke SendMessage,hComboBox,CB_ADDSTRING,0,edx
    pop ebx
    add ebx,sizeof mat_struct
mov eax,[ebx]
test eax,eax
jnz loop_combo
invoke SendMessage,hComboBox,CB_SETCURSEL,0,0
mov ebx,pmat_struct
lea ebx,(mat_struct ptr[ebx]).bE
invoke SendMessage,hS1,WM_SETTEXT,0,ebx
mov ebx,pmat_struct
lea ebx,(mat_struct ptr[ebx]).bSigma
invoke SendMessage,hS2,WM_SETTEXT,0,ebx
```

```

.elseif eax==WM_COMMAND
    mov          eax,wParam
    and          eax,0FFFFh
    .if eax==1015
        invoke SendMessage,hComboBox,CB_GETCURSEL,0,0
        mov ebx,pmat_struct
        imul edx,eax,sizeof mat_struct
        add ebx,edx
        push ebx
        lea ebx,(mat_struct ptr[ebx]).bE
        invoke SendMessage,hS1,WM_SETTEXT,0,ebx
        pop ebx
        lea ebx,(mat_struct ptr[ebx]).bSigma
        invoke SendMessage,hS2,WM_SETTEXT,0,ebx
    .elseif eax==1021;расчитать
        invoke SendMessage,hE1,WM_GETTEXT,50,ADDR bSlistazapol
        invoke SendMessage,hE3,WM_GETTEXT,50,ADDR bShagZapolA
        invoke SendMessage,hE4,WM_GETTEXT,50,ADDR bHmax
        invoke SendMessage,hE6,WM_GETTEXT,50,ADDR bShirDiff
        invoke SendMessage,hE7,WM_GETTEXT,50,ADDR bi
        push eax
        invoke FpuAtoFL,ADDR bSlistazapol,ADDR tSlistazapol,DEST_MEM
        invoke FpuAtoFL,ADDR bShagZapolA,ADDR tShagZapolA,DEST_MEM
        invoke FpuAtoFL,ADDR bHmax,ADDR tHmax,DEST_MEM
        invoke FpuAtoFL,ADDR bShirDiff,ADDR tShirDiff,DEST_MEM
        pop ecx
        mov ebx,offset bi
        invoke str2int
        mov i,eax
        invoke DestroyVars
        invoke InitVars
        invoke GetMatFromIni
        invoke CalcDeltaH
        invoke CalcHshag
        invoke CalcHotnosit
        invoke CalcPzapol
        invoke SendMessage,hComboBox,CB_GETCURSEL,0,0
        imul eax,eax,sizeof mat_struct
        add eax,pmat_struct
        invoke CalcPress,eax
        invoke SendMessage,hComboBox,CB_GETCURSEL,0,0

```

```

    imul eax,eax,sizeof mat_struct
    add eax,pmat_struct
    invoke CalcTime,eax
    invoke FormatResult
    invoke SendMessage,hMemo,WM_SETTEXT,0,pMemo
.elseif eax==1022;сохранить
    invoke SendMessage,hComboBox,CB_GETCURSEL,0,0
    imul eax,eax,sizeof mat_struct
    add eax,pmat_struct
    invoke CalcPress,eax
    invoke SendMessage,hComboBox,CB_GETCURSEL,0,0
    imul eax,eax,sizeof mat_struct
    add eax,pmat_struct
    invoke CalcTime,eax
    invoke RtlZeroMemory,ADDR sOP,sizeof OPENFILENAME
    mov sOP.lStructSize,SIZEOF sOP
    mov eax,hWin
    mov sOP.hwndOwner,eax
    mov eax,OFFSET nam_
    mov sOP.lpstrFile,eax
    mov sOP.nMaxFile,255
    mov eax,OFFSET sFileFilter
    mov sOP.lpstrFilter,eax
    mov sOP.nFilterIndex,1
    mov sOP.lpstrFileTitle,0
    mov sOP.nMaxFileTitle,0
    mov sOP.lpstrInitialDir,0
    mov sOP.Flags,OFN_PATHMUSTEXIST
    mov sOP.lpstrTitle,OFFSET sDialog
    mov sOP.lpstrDefExt,offset sDefExt
    invoke GetSaveFileName,ADDR sOP
    mov eax,offset nam_
    invoke          CreateFile,ADDR          nam_,GENERIC_READ          or
GENERIC_WRITE,0,0,CREATE_ALWAYS,FILE_ATTRIBUTE_NORMAL,0
    push eax
    invoke FormatExport
    pop ecx
    push ecx
    invoke WriteFile,ecx,pMemo,eax,ADDR tmp12,0
    pop eax
    invoke CloseHandle,eax

```


```
        .endif
    .elseif eax==WM_CLOSE
        invoke DestroyWindow,hWin
    .elseif uMsg==WM_DESTROY
        invoke PostQuitMessage,NULL
    .else
        invoke DefWindowProc,hWin,uMsg,wParam,lParam
        ret
    .endif
    xor  eax,eax
    ret
WndProc endp
end start
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор ИАЗ - филиала
ОАО «Научно-производственная корпорация «Иркут»



 Сергунов А.В.

« 21 » 10 2014 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Колесникова Алексея Владимировича

Мы, нижеподписавшиеся, главный технолог ИАЗ Богданов К.В., начальник отдела заготовительно-штамповочных работ Свистов А.Н., научный руководитель Шмаков А.К., составили настоящий акт о внедрении результатов диссертационной работы Колесникова А.В. «Пневмотермическая формовка трёхслойных клиновидных панелей из титановых сплавов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.02 «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов».

Результаты диссертационной работы Колесникова А.В. были использованы в теме «Разработка и внедрение технологических процессов формообразования тонколистовых деталей летательных аппаратов из труднодеформируемых материалов в режиме сверхпластичности», реализованной в рамках проекта «Разработка и внедрение комплекса высокоэффективных технологий проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолета МС-21», шифр 2010-218-02-312, по договору между ФГБОУ ВПО Иркутский Государственный Технический Университет и ОАО «Научно-производственная корпорация «ИРКУТ» от 27 августа 2010 г. № 334/10.

Результаты диссертационной работы были применены для определения свойств сверхпластичности титанового сплава ОТ4-1, определения режимов технологического процесса пневмотермической формовки серийных деталей «Обтекатели», а также для отработки процесса их изготовления.

Разработанные в диссертационной работе методики и рекомендации позволяют сократить затраты на технологическую отработку процесса формовки, получить оптимальные режимы деформирования и обеспечить производство деталей высокого качества.

Главный технолог

Богданов К.В.

Зам. главного технолога - начальник отдела
заготовительно-штамповочных работ

Свистов А.Н.

Научный руководитель, к.т.н., доцент

Шмаков А.К.

ПРИЛОЖЕНИЕ В



УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор

Н.П. Коновалов

« 09 » 2014 г.

АКТ

О внедрении в учебный процесс результатов диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
«Пневмотермическая формовка трёхслойных клиновидных панелей из
титановых сплавов»

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой технологии машиностроения, д.т.н., профессор Журавлев Диомид Алексеевич и заведующий кафедрой самолётостроения и эксплуатации авиационной техники к.т.н., доцент Гусев Игорь Николаевич составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Колесникова Алексея Владимировича «Пневмотермическая формовка трёхслойных клиновидных панелей из титановых сплавов» использованы при реализации образовательной программы по специальности 160201 «Самолето- и вертолётостроение» (в дисциплинах «Технология производства самолётов» и «Технология заготовительно-штамповочных работ»), а также при выполнении курсовых и дипломных работ студентами по специальности 160201 «Самолето- и вертолётостроение» и 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств (в машиностроении)».

Зав. кафедрой технология машиностроения,
д.т.н., профессор

Журавлев Д.А.

Зав. кафедрой СМиЭАТ,
к.т.н., доцент

Гусев И.Н.

К.т.н., доцент

Шмаков А.К.