

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



МЕРКУЛОВ ИЛЬЯ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
СВЕРХЗВУКОВЫХ САМОЛЕТОВ С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ**

Специальность 05.07.02 – Проектирование, конструкция и
производство летательных аппаратов

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ендогур Аскольд Иванович

Москва 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Исследование проблем проектирования сварных авиационных конструкций	14
1.1 Современное состояние методологических проблем конструктивно- технологического проектирования, расчета и оптимизации сварных конструкций	14
1.2 Роль и место сварных отсеков в авиационных конструкциях	32
1.3 Классификация сварных отсеков	39
Глава 2. Разработка методики проектирования сварных авиационных конструкций с учетом технологических факторов	44
2.1 Общая структура методики	44
2.2 Формирование конструктивно-технологической схемы.....	47
2.3 Учет нелинейностей	49
2.4 Учет технологических особенностей	50
2.5 Блоки расчета	51
Глава 3. Оценка эффективности методики проектирования сварных отсеков с учетом конструктивно-технологических схем	56
3.1 Выбор расчетного отсека в конструкции сверхзвукового самолета	56
3.2 Алгоритм расчета	58
3.3 Результаты расчета	63
3.4 Анализ результатов расчета	76
Глава 4. Оценка достоверности методики проектирования сварных конструкций	81
4.1 Верификация расчетов МКЭ	81
4.2 Валидация расчетной модели	85
Заключение	87
Список сокращений и условных обозначений	89
Список литературы	90
Приложение А. Формализация поперечных сечений (F_i) элементов каркаса	

сварного отсека	97
Приложение Б. Выборка КТС исследования	99
Приложение В. Копия акта о внедрении результатов исследования	101

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Потребность в совершенствовании конструкций летательных аппаратов требует и более совершенных инструментов достижения такого совершенства в части методик проектирования сварных тонкостенных конструкций.

Развитие современной авиационной и ракетно-космической техники в области увеличения скоростей полета, а также накопленный опыт при проектировании такой техники выделяют особое место для использования сварки в разработке и создании монолитных конструкций с высоким весовым совершенством, например, сварных. Широкое распространение сварных соединений в авиа- и ракетостроении обусловлено следующими факторами:

- потребностью получения монолитных герметичных соединений для интегральных конструкций кабин экипажа, пассажирских кабин, отсеков-баков и топливных емкостей;
- применением высокопрочных легированных нержавеющей (или слаборжавеющих) сталей, титановых сплавов или алюминиевых сплавов, работающих при больших силовых потоках, в условиях высоких температур;
- хорошей возможностью автоматизации процесса сварки в крупносерийном производстве при общем снижении уровня трудоемкости его выполнения.

Вопросы и проблемы при проектировании и конструировании сварных конструкций неразрывно связаны с технологией производства. Следует отметить высокую степень вариативности при выборе конструктором вида сварки и типа сварного соединения – *точечного* или *сплошного*, а также способов сварки.

Для *точечного* сварного соединения отметим технологические особенности сварной точки: наличие концентрации напряжения литой зоны ядра и околосварочной зоны термического влияния. Положительные конструктивные отличия от заклепочного или болтового соединений заключаются в *герметичности сварной точки и в отсутствии работы на смятие*. Опишем следующие недостатки сварного соединения:

- при бóльшей прочности сварной точки имеет место увеличенная жесткость этого соединения (меньшая податливость);
- при точечной электросварке (ТЭС) пакетов из сталей отмечается выжигание легирующих элементов – это явление привело к появлению требования наполненности топливных баков самолетов во время стоянки с целью исключения коррозии;
- при ТЭС пакетов из алюминиевых сплавов требуется предварительное нанесение пасты на поверхности будущего соединения, предупреждающей коррозию;
- при сварке алюминиевых материалов (в сравнении с титановыми и стальными сплавами) необходимо бóльшее усилие прижима пакета. Это связано, в первую очередь, с наличием плотной оксидной пленки у алюминия;
- наличие характерного «краевого» эффекта для шва, состоящего из точечных соединений (например, крепление стрингеров к обшивке), выражающийся в более сильном нагружении крайних точек шва, и соответственно, в более раннем разрушении по крайним точкам, требующий дополнительного усиления конструкции краев стрингеров специальными накладками – «наездниками» и, соответственно, увеличенной сварной точки в указанном месте утолщения (или увеличения их концентрации на границах шва).

Отличительной особенностью сварных конструкций является наличие зон термического влияния (ЗТВ) в местах, граничащих с расположением сварных швов и точек.

Из этого следует, что конструкции цельносварных агрегатов имеют многообразие решений, что, в свою очередь, ведет к необходимости создания типовых вариантов конструктивно-технологических схем, которые можно использовать для оптимизации различных сварных конструкций.

Следует заметить, что вне зависимости от содержания подхода при проектировании и оптимизации конструкции, только единственный критерий может быть применен для решения задачи, поскольку одновременное удовлетворение требованиям прочности, жесткости и массы сварных конструкций невозможен.

При учете таких противоречивых критериев выбирается один в качестве основного, а остальных переходят в функциональные ограничения оптимизационной задачи.

Актуальность исследования заключается в необходимости создания методик проектирования, учитывающих комплексное нагружение и технологические особенности.

Степень разработанности темы

Настоящее диссертационное исследование является попыткой автора создать усовершенствованную методику проектирования и оптимизации конструкций сверхзвуковых самолетов с учетом конструктивно-технологических факторов.

Большое влияние при написании диссертационной работы оказала книга Денисова Б.С., Мейлах А.И. «Сварка в самолетостроении. Сварные конструкции МИГов» [1].

Методы проектирования и расчета авиационных конструкций основываются на работах отечественной школы авиастроения [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]. Среди зарубежных источников в этой области необходимо отметить работы [13], [14].

Методикам расчета оптимальных статически неопределимых конструкций посвящены работы [4], [12], [15], [16], [17], [18], [19] и др.

В современных условиях результаты ранее опубликованных работ не всегда удается использовать в полной мере, особенно, когда речь идет о сварных конструкциях. Современные математические модели и методики расчета сварных конструкций разработаны на основе многих авторов [20], [21], [22] и позволяют досконально исследовать поведение разнообразных конструкций, моделируя движение источника тепловых сварочных потоков с использованием модели двойного эллипсоида Гольдака, которая описана в монографии ее автора [23, с. 30], имеющей в своей основе классическую формулу Рыкалина для теплового источника [22]. Однако, такие модели сложны в применении, поскольку воспроизводят нестационарный тепловой процесс, учитывающий все входящие и исхо-

дящие тепловые потоки в процессе сварки. Следует отметить, что, как правило, такие модели реализуются для сварных конструкций, которые уже находятся на стадии производства или имеют уже утвержденный вариант конструктивно-силовой схемы (КСС), оставляя лишь технологические приемы в качестве резервов для оптимизации таких изделий. Существуют методики оптимизации, позволяющие учитывать влияние конструктивных параметров на будущий облик рациональной конструкции [3], [4], [7], [16], [24]. Однако и эти методики не позволяют учесть часть факторов, в особенности, технологических, влияющих на выбор рациональных параметров конструкции.

В рассмотренных автором публикациях и научных трудах одновременного учета конструктивных и технологических факторов в проектировании оптимальных (рациональных) сварных конструкций нет, но сейчас их учет наиболее актуален в связи интенсификацией внедрения сварных соединений в конструкциях авиационно-космической техники. Интенсификация, с одной стороны, связана с развитием робототехники, позволившей повысить количество и качество сборок, выполняемых на автоматизированной линии, а с другой стороны, обязана появлением новых свариваемых материалов [25], обладающими новыми качествами прежде недоступными. Стоит также отметить бурное развитие перспективных методов сварки трением с перемешиванием, диффузионной и лазерной сварок [25], [26].

Наличие сварочных деформаций и остаточных напряжений после сборки-сварки конструкции сверхзвукового самолета приводит к невозможности создания оптимальной конструкции. А возврат к применению сборных болтовых конструкций приводит к существенному увеличению массы всей конструкции (при утяжелении более чем вдвое в нерегулярных зонах конструкции) [1, с. 49].

Имеют место технологические особенности сварных конструкций, влияющие на последующую эксплуатацию, обслуживание и ремонт. *Общепринято, что ремонт конструкций производится по технологии, с помощью которой она была создана. Ремонт сварных швов (подварка) неблагоприятно сказывается на ресурсе сварных соединений, и, по возможности, должны быть сведены к минимуму.*

Постановка цели и задачи диссертации

Для всех типов сварки и конфигураций швов в конструкциях агрегатов сверхзвуковых самолетов характерно образование сложной картины остаточных внутренних напряжений, вызывающих, как правило, и значительное коробление свариваемых деталей, например, при сварке встык за счет последовательности нагрева под сварку и застывания расплавленного металла.

Величина этих напряжений обусловлена множеством причин. Чем выше температура сварочной дуги или другого источника тепла, например, потока частиц в электронно-лучевой сварке (ЭЛС), чем медленнее она движется, тем большее количества материала будет разогрето до плавления. Чем резче будет охлаждение деталей при сварке и чем меньше при этом будет теплопроводность свариваемых элементов конструкции, тем больше будут внутренние напряжения. Изучение влияния величины концентрации и дифференциации остаточных напряжений в авиационных сварных конструкциях достойно отдельного развернутого исследования.

Фактически остаточные напряжения в ЗТВ могут быть, как и растягивающими, так и сжимающими. При растяжении будет увеличена опасность усталостного разрушения. Практически существуют множество методов борьбы с опасными внутренними напряжениями. Наиболее характерные из них: отпуск после сварки (иногда производится вместе со стапелем) и наклеп/прокатка нагруженных поверхностей (во время или после сварки) [27]. Последний метод наиболее эффективен после снятия «усиления» шва. Наклеп или нагартовка нагруженных поверхностей может резко улучшить сопротивление сварных швов некоторым видам коррозии, например, коррозии под напряжением.

Цель диссертационного исследования состоит в разработке методики проектирования рациональных сварных отсеков в условиях сложного комбинированного нагружения при учете конструктивно-технологических особенностей. В диссертации используется определение «конструктивно-технологическая схема» или, сокращенно, КТС. Оно употреблено вместо нормированного термина «конструкторско-технологическое решение» (КТР). Согласно ГОСТ Р 50995.0.1-96:

«конструкторско-технологическое решение – реализованное в производстве комплексное инженерное решение по перспективной конструкции материала, детали, сборочной единицы, составной части или продукции в целом и прогрессивному методу ее реализации в производстве» [28]. Принятое новое определение объясняется тем, что этап, на который рассчитано исследование, следует отнести к стадиям НИОКР, т.е. в период до производства изделия. Иными словами, КТС – часть процесса для достижения КТР, инструмент получения такого конструкторско-технологического решения.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1. Классификация и создание моделей типовых КТС сварных отсеков, имеющих сложную конфигурацию и работающих в условиях комбинированного нагружения, в том числе при повышенной температуре.
2. Разработка численной модели объекта исследования, учитывающей нелинейности.
3. Разработка методики проектирования отобранных КТС моделей сварных отсеков, учитывающей условия конкретного производства.
4. Определение оптимальной КТС посредством численного моделирования по критерию минимума массы конструкции.
5. Оценка влияния конструктивно-технологических факторов на выбор оптимальной (рациональной) КТС конструкции сварного отсека.
6. Формирование рекомендаций по выбору оптимальных (рациональных) авиационных сварных конструкций сверхзвуковых самолетов.

Таким образом, в рамках диссертационного исследования выполнен расчет конструкции силовых элементов и оптимизация конструкции сварных отсеков сверхзвуковых самолетов с учетом конструктивно-технологических особенностей на базе созданной методики. Задача, которую необходимо решить – создание модели учета концентрации остаточных напряжений в силовых элементах. Возможность реализации создания конструкции определена с учетом условий современного производства и с использованием существующего оборудования.

В научном исследовании разработана методика оптимизации КТС при учете порядка сборки узлов, панелей и агрегата в целом, с целью минимизации силовой массы конструкции при минимуме монтажных и стапельных напряжений/деформаций узлов агрегата.

Объектом исследования является типовой сварной отсек конструкции планера сверхзвукового самолета под действием комбинированной нагрузки с учетом остаточных напряжений после сварки.

Предметом исследования является процесс (методика) проектирования рациональных сварных отсеков сверхзвуковых самолетов на начальном этапе создания изделия с учетом их конструктивно-технологических схем при комплексном нагружении.

Научная новизна заключается в учете совместного влияния комплексного нагружения и конструктивно-технологических схем при проектировании сварных отсеков сверхзвуковых самолетов.

В исследовании поставлена основная задача по созданию *методики проектирования рациональных сварных конструкций с учетом конструктивно-технологических факторов, в том числе остаточных напряжений после сварки.*

Теоретическая и практическая значимости работы

Теоретическая значимость заключается в создании методики проектирования сварных отсеков с учетом конструктивно-технологических факторов при заданных ограничениях. Методика позволит конструкторам, технологам и специалистам производства выбирать рациональные КТС сварных конструкций в процессе проектировании сверхзвуковых самолетов.

Практическая значимость заключается в сокращении сроков разработки сварных авиационных отсеков сверхзвуковых самолетов, в том числе при простой реализации методики на ПЭВМ.

Методология и методы исследования

Когда в процессе проектирования конструкций стали применять мощную вычислительную технику, то наряду с классическими методами расчета конструкций, основанными на инженерных теориях (тонкостенных стержней, балок,

пластин, биконструкций) [9], [10], [11] стало возможным использовать численные методы, учитывающие нелинейное поведение конструкции. В диссертационной работе используется численный метод конечных элементов (МКЭ) на ранней стадии создания сварного отсека сверхзвукового самолета. Данный метод применяется для исследования сложного напряженно-деформированного состояния (НДС) сварных отсеков и позволяет рассчитать изделие с достаточной точностью при умеренной степени идеализации его конструкции. На базе этого метода также реализуется учет сварочных явлений. Так, для учета усадки сварного шва был применен «метод врожденных деформаций» («inherent strain theory») [29], имеющий в своей основе метод фиктивных сил, разработанный отечественной школой в 1960-х гг. [30, с. 83]. Помимо указанных специальных методов, используются общенаучные методы системного анализа и синтеза.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель сварного отсека сверхзвукового самолета.
2. Модифицированная методика проектирования сварных авиационных конструкций.
3. Зависимости массы сварного отсека от конструктивно-технологической схемы в критериальном пространстве «конструкция – технология».

Степень достоверности

Достоверность полученных результатов основывается на проверенных инженерной практикой методах, а также на корректном математическом анализе расчетной модели сварного отсека сверхзвукового самолета.

Апробация результатов

Основные положения диссертации докладывались на 16-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» в 2017 г., тезисы представлены в материалах II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» в 2019 г.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих журналах: «Труды МАИ» в 2017 г., «Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника» в 2019 г., входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав и заключения. Работа представляет собой рукопись объемом 103 страницы печатного текста, включая 39 рисунков, 3 таблицы и 3 приложения, а также список литературы, содержащий 76 наименований.

Во **введении** дается обоснование актуальности темы диссертации, приведены перспективы использования сварных конструкций в различных областях человеческой деятельности, особенно для сверхзвуковых самолетов. Представлены технические проблемы, которые необходимо преодолеть для создания рациональных конструкций сварных отсеков, определены цели и задачи исследования.

В **первой** главе диссертации приведено исследование проблем рационального конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций. Анализ существующих или применяемых ранее сверхзвуковых авиационных систем позволил классифицировать их по различным идентификационным признакам.

Предложена схема формализации типовых сварных отсеков сверхзвуковых самолетов.

Вторая глава посвящена разработке и описанию методики проектирования рациональных сварных отсеков сверхзвуковых самолетов с учётом конструктивно-технологических схем. Разработан алгоритм проектирования сварных конструкций авиационных агрегатов с учетом нелинейностей и технологических особенностей. Предложен способ организации конструктивно-технологических схем в критериальном пространстве «конструкция - технология».

В **третьей** главе проведена оценка работоспособности предложенной методики на примере сварного отсека фюзеляжа сверхзвукового самолета. С помощью численного моделирования установлены зависимости несущей способности верхней сжатой панели отсека от конструктивно-технологических особенностей.

Определены значения критерия массы конструкции сварного отсека для заданной выборки конструктивно-технологических схем.

В **четвертой** главе проведена верификация расчетов и валидация математической модели сварного отсека сверхзвукового самолета. Были даны ответы на основные верификационные вопросы. Было представлено сравнение результатов расчета с разной плотностью конечно-элементных сеток.

В **заключении** приведены основные положения диссертации, характеризующие ее научное содержание как разработку новой методики проектирования сварных конструкций сверхзвуковых самолетов с учетом их конструктивно-технологических схем, а также даны предложения по дальнейшему ее использованию.

Приложения к диссертационной работе включают следующие материалы:

- схему формализации поперечных сечений элементов каркаса исследуемого сварного отсека;
- выборку КТС сварного отсека, анализируемых в исследовании;
- копию акта о внедрении результатов исследования.

Автор считает своим долгом выразить благодарность канд. техн. наук О.Б. Пашенко и докт. техн. наук В.В. Овчинникову за полезные замечания по содержанию рукописи и ценные советы, данные в процессе ее подготовки.

ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

1.1 Современное состояние методологических проблем конструктивно-технологического проектирования, расчета и оптимизации сварных конструкций

Актуальное состояние общей методологии конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций и авиационных конструкций в частности представлено в широком спектре специальностей и секторов промышленности. Например, в работе [31] проведен анализ этапов конструктивно-технологического проектирования сварных узлов энергетических установок. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований критериев локальных хрупких разрушений при изготовлении и эксплуатации сварных конструкций. Обоснован наиболее эффективный методологический подход к проектированию конструкций и технологий.

В части методологии конструктивно-технологического проектирования неметаллических изделий имеются теоретические и практические результаты, включающие в себя синтез приближенных зависимостей свойств сотовых заполнителей и конструкций из углепластиков для оценки эффективности конструктивно-технологических решений изделий данного класса [32].

Высокая стоимость, сложность разработки ЛА обуславливают необходимость применения таких методов проектирования, которые позволили бы в той или иной мере количественно учитывать и взаимоувязывать основные факторы, определяющие эффективность разрабатываемого ЛА. К числу этих факторов относятся не только летно-технические и технологические характеристики, сложность производства, отработанность технологии, материалоемкость, стоимость изготовления и т.д., влияющие на общую экономическую эффективность, но и живучесть конструкции ЛА. Под живучестью конструкции в работе [33] принималась способность ЛА после получения расчетного максимально допустимого

повреждения продолжить выполнение задания или вернуться на место базирования с меньшими перегрузками. В указанной работе представлена модель и алгоритм оптимального проектирования оболочечных конструкций различных конструктивно-силовых схем ЛА с учетом основных требований живучести на основе аналитической оценки несущей способности, приведены результаты проектирования.

Огромный пласт базовых исследований сварочных процессов [19], [23], [30], [34], [35], [36], [37], [38] посвящен разработке методов расчета сварных конструкций, учитывающий с определенной точностью влияние конструкторско-технологических факторов при сборке-сварке. Указанные источники являются примерами классических работ в области исследования сварки и тепловых процессов, происходящих при ее применении.

В вопросах тематики, относящихся к актуальным и современным расчетным методам, и использующихся при анализе и расчете сварных конструкций, существуют фундаментальные работы [22], [39], [40], [41]. В этих работах излагаются основные численные методы расчета, применяемые во всех расчетных численных моделях. Здесь во главу поставлен метод конечных элементов [42], базирующийся на численных методах расчета применительно к анализу нестационарного теплового потока внутри свариваемой конструкции. Беспрецедентное развитие вычислительной техники в последние годы и ее многократное удешевление позволило данным методам быть реализованным на базе ПЭВМ с помощью прикладного программного обеспечения. Что и определило, в значительной мере, их распространенность и популярность на текущий момент при анализе готовых сварных изделий.

Как уже отмечалось, методология проектирования и расчета сварных конструкций используется в разных областях промышленности. Исторически, большая доля всех конструкторско-технологических исследований сварных конструкций связана с судостроением. В [43] отмечалось, что многие годы разрабатывалась теория для оценки сварочных деформаций и практических мероприятий для снижения или компенсации таких деформаций в процессе сварки. В течение про-

должительного времени использующаяся методология базировалась на аналитических зависимостях. Эта методология позволяла определять объемные изменения металла при нагреве в процессе сварки и последующего охлаждения. Однако, зависимости для определения деформаций конструкций, возникающих как результат объемных изменений металла в сварной зоне, позволяли производить вычисления только для простых конструкций, из элементов, объединяющих плоские сегменты и сегменты с маленькой кривизной. В случае со сложными объемными конструкциями, оценки, основанные на аналитических зависимостях, давали значительные ошибки.

Для устранения этого недостатка, было предложено использовать МКЭ с целью решения деформационной проблемы. В этом методе, во-первых, должны быть рассчитаны объемы от продольных и поперечных усадок сварных соединений используя аналитические зависимости и затем, с полученными значениями усадок, вычислены силы (ранее упомянутый метод фиктивных сил), которые эквиваленты по воздействию в сварочных напряжениях. Далее создается конечно-элементная модель (КЭМ) конструкции и к ней прикладываются эквивалентные силы. Имея результаты расчетов, из ряда вариантов сборок-сварок выбирается оптимальный и специальными измерениями для снижения или компенсации сварочных деформаций разрабатывается и берется искомый вариант. Что особенно примечательно, результаты указанного исследования применялись при постройке габаритной цельносварной конструкции понтона-ледокола платформы «Приразломная». Благодаря комбинированному способу расчета, оказалось возможным рассчитать сварочные деформации крупногабаритных конструкций, был выбран оптимальный способ сварки понтона платформы «Приразломная» и для выбранного маршрута сварки были получены отмеченные значения поводов.

Математические модели, необходимые для решения задач оптимального проектирования изложены во многих трудах. Так, в работе [44] рассматривается класс нелинейных динамических моделей оболочек, нелинейность которых отражает гауссову кривизну поверхности; в случае, когда нагрузки, действующие на оболочку меньше критических в любой момент времени. При этом любая неиз-

вестная функция, входящая в уравнения системы, однозначно выражается через функцию прогиба, а область, определяемая срединной поверхностью оболочки, является ограниченной и имеет кусочно-гладкую границу. К этому классу уравнений относятся такие модели как модель Кирхгофа-Лява, уточняющая ее модель Тимошенко, заданная как в перемещениях, так и в смешанной форме, модель, отражающая связь полей деформации и температуры и другие модели. Для таких моделей в качестве численного метода расчета напряженно-деформированного состояния обсуждается метод последовательного нагружения, разработанный в 70-х годах XX века профессором В.В. Петровым, который сводит решение нелинейных уравнений к решению последовательности линейных уравнений. В работе обсуждаются вопросы, связанные с реализацией этого метода. Известно, что метод В.В. Петрова медленно сходится. Поэтому рассматриваются вопросы, связанные с улучшением сходимости. Далее, применение вариационных методов для решения линейных систем уравнений требует определения скорости сходимости этих методов, а также нахождения ортогональной системы функций, удовлетворяющей граничным условиям. Эти вопросы также рассматриваются в описанной работе.

В статье [45] представлена общая постановка и схема решения задачи анализа конструктивно-технологических решений складных рулей. Алгоритм решения основывается на зависимостях, представленных в работе [46], при этом он содержит ряд изменений, вызванных конструктивными особенностями рассматриваемого объекта.

Для системы автоматизированного проектирования технологии изготовления сварных конструкций в [47] предложен новый подход к решению задачи построения технологического маршрута изготовления изделия.

Обычные методологии проектирования или игнорируют, или используют эмпирические методы для оценки последствий сварки на прочность конструкции и контроль размеров сварных конструкций. Для эффективной оценки влияния сварки на свойства конструкции и для эффективного использования различных компенсирующих методов контроля или противодействия сварочным деформаци-

ям необходима методология их прогнозирования. В статье [48] ее авторами представлена методика численного анализа для прогнозирования сварочной деформации. Методика сочетает двумерное моделирование сварки и трехмерный силовой анализ при несвязанном подходе. Отметим, что преимущество несвязанного подхода заключается в простоте вычислений и их эффективности. Не выполняется сложное трехмерное моделирование сварки. Кроме того, для различных размеров сварных швов или ввода тепла, остаточные напряжения, которые здесь рассматриваются как нагрузка на конструкцию, могут быть вычислены независимо от силового расчета. Такой подход позволяет оценить первоначальный вариант и следующие модификации без необходимости выполнения какого-либо дополнительного моделирования сварки. Во многих случаях влияние конструкции доминирует в НДС, которое сильно отличается от того, что предсказано только лишь моделированием сварочной зоны. Некоторые виды деформации, особенно выделения, выпучивания обшивок, вызванные продольными напряжениями, не могут быть представлены посредством двумерной модели в плоскости, перпендикулярной направлению сварки. Тем не менее, использование полноценной трехмерной модели для выполнения термомеханического моделирования сварки сложных конструкций непрактично и препятствует ускорению вычислений, и как следствие, замедляет процесс проектирования.

Численный метод в [48] использован при оценке потери устойчивости, вследствие сварки. Численные прогнозы могут быть использованы либо в качестве критерия оценки проекта, либо как инструмент анализа в производстве. В качестве инструмента проектировщика, могут быть определены сварочные явления и могут быть включены в оценку и оптимизацию вариантов конструкции. Как инструмент анализа в производстве, для выбранного варианта конструкции, могут быть оценены различные сварочные процессы и процедуры с целью минимизации сварочных деформаций. Полученными экспериментальными результатами от небольших и крупных макетных панелей подтверждался выбранный подход в численном моделировании.

Там же была представлена методика прогнозирования поводов конструкции от сварки и оценки структурной целостности сварных конструкций. Описан термоупругопластический анализ МКЭ для моделирования сварки наряду с трехмерным анализом собственных значений конструкции, которые выполнялись для прогнозирования нагрузки вызываемой сварным швом и критическую нагрузку потери устойчивости конструкции. Данный подход уточняли при оценке потери устойчивости при продольном сжатии и реализовали на примере корабельной конструкции панели-макета. Использование двумерного моделирования сварки снижает время вычислений и стоимость. Было показано, что использование твердотельных моделей элементов конструкции при силовом анализе дополнительно повышает эффективность модели и позволяет легко изменять геометрию. Прогностическая подход реализован на различных этапах проектирования и производственного цикла. На стадии проектирования, могут быть исследованы все процедуры сварки, а затем разработаны различные геометрические конфигурации. Например, чтобы оценить потери устойчивости панели от сварки, изменяется толщина листа, размер и положение усилений. Эта методика также может быть использован для управления искажения для установленных конструкций. В этом случае критическая нагрузка потери устойчивости в структуре определяется от одного анализа собственных частот конструкции. Различные процессы и варианты сварки проверяются на наличие условий, где величина нагрузки от сварного шва меньше установленного критической нагрузки потери устойчивости. Этот подход также может быть использован для оценки эффективности и установить рабочие параметры для методов смягчающих послесварочные деформации и поводки. При определенных условиях или ограничениях, разработанная методика не может установить базовые параметры, при которых, в стандартных условиях, прилагаемая нагрузка от сварного шва может быть обеспечена ниже критической нагрузки потери устойчивости конструкции. Такое может быть в случае существующей конструкции, что потребует минимального размера шва или в том случае, когда, из-за ограничения массы, невозможно увеличить толщину листа достаточно, чтобы избежать общей потери устойчивости панели. В этих условиях

единственным способом избежать потери устойчивости является использование методов «смягчения» последствий сборки-сварки.

Остаточные напряжения влияют на устойчивость и деформативность конструкций. Это влияние неоднозначно, поэтому актуальным является вопрос о распределении остаточных напряжений в сечениях элементов. В первую очередь это относится к элементам с сечениями из сварных двутавровых профилей, таврового из парных уголков и электросварных прямошовных труб. Экспериментально доказано снижение критических сил для сжатых сварных двутавровых элементов из-за наличия в поясах остаточных сжимающих напряжений и увеличение критических сил для сжатых элементов из труб после наплавки валиков на кромках под углом 120 градусов. Необходимость проведения настоящих исследований возникла в связи с отсутствием в нормативной литературе рекомендаций по определению остаточного напряженного состояния и его учета при расчетах сжатых элементов из труб [49].

С позиции методов оптимизации конструкций в [50] авторами было показано, что важным этапом процесса решения задач проектирования ракетно-космических и авиационных конструкций является осуществление расчетов по оптимизации их ключевых характеристик. В статье приведены результаты решения четырех прикладных задач условной оптимизации, связанных с проектированием различных технических систем: определения наилучших параметров сварной балки, сосуда высокого давления, редуктора, пружины. Целью каждой задачи является минимизация стоимости или веса конструкции. Целевые функции в практических задачах оптимизации представляют собой нелинейные функции с большим числом переменных и сложным рельефом поверхностей уровня. Поэтому применение классических методов поиска экстремума неэффективно. Возникают необходимость использования таких методов оптимизации, которые позволяют находить решение (близкое к оптимальному значению) за приемлемое время с наименьшими затратами вычислительных ресурсов. К таким методам относятся методы «роевого» интеллекта: метод, имитирующий спиральную динамику; метод, имитирующий поиск группой людей; метод стохастической диффузии, отно-

сящиеся к метаэвристическим. Методы «роевого» интеллекта сконструированы таким образом, что поиск точки экстремума производится популяцией (стаей), состоящей из агентов. Агенты (частицы) в ходе поиска точки экстремума обмениваются информацией, учитывают свой опыт, а также опыт лидера популяции и соседей, входящих в некоторую окрестность. Для решения перечисленных задач разработан комплекс программ, эффективность которого продемонстрирована результатами решения четырех прикладных задач. Каждая из рассмотренных прикладных задач оптимизации решена всеми тремя выбранными методами. Полученные численные результаты сравнимы с найденными значениями методом частиц в стае. Приведены рекомендации по выбору параметров методов и значений функций штрафа, учитывающих выполнение ограничений типа неравенств.

В связи с увеличением требований к повышению качества сварных конструкций, стало необходимым принимать во внимание вариативность процесса расчета на этапе технологического планирования процесса сварки. Оптимизация столь вариативного процесса сборки-сварки на основе традиционных экспериментов исключительно дорога и не всегда гарантирует обеспечение комбинацией оптимальных параметров.

(Ар)ДЭС является основным сборочным процессом, используемым в авиационной, судостроительной, автомобильной и других отраслях промышленности. Этот способ выделяется по сравнению с другими сборочными процессами за счет своих конкурентных преимуществ таких как: низкая стоимость, повышенная прочность соединения, и широкий спектр применения. Тем не менее, одной из основных проблем сварки является деформация сварной конструкции. Деформация влияет на характеристики сварных конструкций в виде снижения работоспособности соединения и точности размеров. Несмотря на огромное развитие технологии ДЭС в течение многих лет, деформация, спровоцированная сваркой, является одним из основных препятствий, в сварочной отрасли промышленности, к обеспечению адекватной надежности и эксплуатационных качеств сварных конструкций.

Исправление сварочных деформаций часто требует дополнительных после-сварочных работ, которые, как правило, дороги, отнимают много времени и практичны только в самых критических применениях. Лучше всего, чтобы минимизировать деформации или управлять ими – надлежащая разработка процесса сварки за счет тщательного отбора различных сварочных исходных данных. Несколько параметров процесса сварки влияют на деформацию. Лучший контроль этих параметров позволит устранить условия, способствующие деформации.

Исследователи в [51] отмечают, что контроль над определенными сварочными переменными устранит условия, которые способствуют поводкам. Они включают в себя: уменьшение размеров и длины угловых сварных швов, в том числе точечных сварных швов; использование высокоскоростной сварки; использование сварок с низким уровнем рассеиваемого тепла; использование прерывистых швов; использование сварочной техники «шаг вперед – шаг назад» (а также, обратно-ступенчатый порядок наложения сварных швов); баланс тепла около нейтральной оси пластины при стыковой сварке. Авторы также обращают внимание, что некоторые компенсирующие методы, в том числе, предварительное напряжение и подогрев панелей в процессе сборки, были исследованы и используются в некоторых производствах. В статье изучаются механизмы деформаций и воздействие маршрута сварки на деформацию панели. В этом исследовании, поведение деформаций, включающее местный изгиб и выпучивание обшивки, а также общий изгиб продольных силовых элементов, было исследовано с помощью МКЭ. Было обнаружено, что выпучивание не происходит в конструкциях с толщиной обшивок из листа более чем 1,6 мм, если продольный набор чрезмерно жесткий на изгиб. Коробление вызвано, прежде всего, искривлением в углах самой обшивки. Разработанный метод, окрещенный как «метод жесткости соединения» (The Joint Rigidity Method – JRM) был предложен как эффективный способ определения оптимального технологического маршрута сборки-сварки с минимальными поводками панелей. Суть метода заключалась в том, что после завершения каждого прохода шва (в том числе технологических сварных швов), прикладывается распределенный единичный момент к каждому соединению на вре-

мя, чтобы определить упругий поворот (отклик) во всех соединениях конструкции панели. Величина расчетных закручиваний соединений нормализуется по максимальному значению, полученному из конструкции панели под ее предшествующим начальным условиям (т.е. до основной сварки, начиная от завершения всех технологических сварных швов). Этот нормализованный параметр является показателем жесткости каждого соединения. Эти индексы жесткости могут изменяться после завершения каждого следующего шва, так как затвердевший (кристаллизовавшийся) сварной шов становится неотъемлемой (монолитной) частью всей конструкции панели. Таким образом, расчеты индекса (коэффициента) жесткости повторяют после каждого шага сварки, чтобы найти наиболее жесткое соединение для укладки последующего шва. Это исследование показало, что во время сборки-сварки конструкции панели лист обшивки нормальной (для рассматриваемой алюминиевой конструкции корабельной панели) толщины (например, $>1,6$ мм) может выпучиваться, если панель деформируется под общим изгибом, вызывая большую кривизну в листе обшивки. Вес конструкции и изгиб жесткостей приводит к общему изгибу панели. Усадка сварного шва в тавровых соединениях вызывает угловую деформацию в листе обшивки.

Располагая швы ближе к нейтральной оси сечения панели можно управлять общим изгибом и свести к минимуму сварочные деформации подкрепленной панели. Другие компенсирующие методы включают использование более мощных жесткостей для увеличения момента инерции поперечного сечения или более ячеистого способа изготовления (большее количество клеток листа на площадь панели), чтобы существенно улучшить сопротивление изгибу конструкции панели.

Используя оптимальный маршрут сварки может улучшить плоскостность панели и минимизировать коробления в листе обшивки. Метод жесткости соединения является эффективным в определении оптимального маршрута сварки с минимальными поводками в обшивке подкрепленных конструкций панелей.

Развивая тему оптимизации технологии сварки исследователи в [52] заявляют, что можно использовать суррогатную модель, чтобы существенно уменьшить вычислительные затраты на последовательные комбинаторные задачи МКЭ.

Суррогатная модель проиллюстрирована здесь на примере проблемы планирования маршрута сборки-сварки профилированной стойки, принадлежащей конструкции корпуса задней опоры турбины реактивного двигателя. Его основными деталями являются: внешнее кольцо, внутреннее кольцо и стойки (неподвижные лопатки). Лопатки обычно привариваются к кольцам с использованием ДЭС с неплавящимся электродом. (Ар)ДЭС представляет собой хорошо известный процесс, применяемый при сварке в авиационной промышленности. Авторы, оценивая текущую методологическую базу, вспоминают эвристические алгоритмы оптимизации однопроходной сварки, более известной по решению оптимизационной задачи «коммивояжера», обращают внимание на результаты ранее рассмотренной работы [51], говоря о неприменимости ее разработок к заданной модели маршрута сборки-сварки стойки. Авторы объясняют это тем, что в рамках наших познаний не существует работ, кроме той, которая представлена, рассматривающих вопрос о создании «черного ящика» суррогатной модели, которую могли бы апробировать, а затем использовать ее для предсказания или оптимизации маршрутов сварки.

В технике, оптимизация часто связана с улучшением (модернизацией) существующей инженерной конструкции. Такие конструкции могут быть получены с использованием аналитических, вычислительных или экспериментальных данных. Во многих случаях это связано с существенными расходами времени, ресурсов и денег. Для того чтобы найти лучший вариант, инженеры, как правило, пробуют несколько проектов, отвергая те, которые не соответствуют заданным критериям, но сохраняя некоторые хорошие. Этот метод «проб и ошибок» может включать много дорогих вычислений или экспериментов. Поэтому, когда приходит время оптимизации, компании, стремятся выбрать проект с небольшими улучшениями или существующий рабочий вариант, часто отказываясь от поиска окончательного оптимального решения. МКЭ во многих случаях дает возможность заменить экспериментальные работы с вычисленной оценкой, так что оптимизация может проводиться с помощью компьютеров, а не в натурных экспериментах. В случаях, когда КЭМ существуют или она сравнительно недорогая в со-

здании, проектировщики могут использовать один из нескольких хорошо известных методов оптимизации. Однако во многих областях техники КЭМ свойственна постоянно растущая сложность, и они используются в основном для проверки предлагаемого варианта. Эти модели, как правило, стремятся быть точными и подробными, но и очень требовательны к вычислительным ресурсам. Работая с дорогими экспериментами либо дорогими вычислениями, не представляется возможным провести прямую работу по оптимизации, так как это может значительно увеличить конечную стоимость продукта.

КЭМ обычно выявляет множество взаимосвязей. Не все из них представляют интерес при модернизации проекта и, следовательно, часто возможно создать модель, которая представляет только интересующие детали, которые обычно составляют очень небольшой процент от общего числа, и тем самым снижают стоимость моделирования. Модели, которые являются упрощенным представлением более сложных моделей, называются суррогатными. Они представляют несколько из множества возможных соотношений, и в зависимости от подхода к моделированию, они могут быть ближе к оптимальной конструкции, чем остальные в области проектного пространства (области проектных параметров). Поскольку суррогатные модели несколько более специфичны, чем более точные модели, они, как правило, весьма недороги для вычислений. С помощью таких моделей решение многих проблем оптимизации, которое прежде считалось невозможным, теперь стало осуществимым.

Оптимизация суррогатной модели включает в себя следующие типовые шаги:

1. Создание проекта начальных этапов подробного (детального) эксперимента.
2. Оценивание целевой функции, экспериментальное или рассчитанное с максимальной точностью.
3. Апробация суррогатной модели, которая может представлять только нужные соотношения.
4. Проведение оптимизации, используя апробированную суррогатную модель.

5. Оценка оптимальной конструкции с использованием дорогостоящего метода из п. 2.
6. Сравнение результатов от суррогатных и от дорогих моделей.
7. Если результаты совпадают или достаточно хороши, то переход к шагу 9.
8. Добавление данного варианта конструкции к существующим типам, и возврат к п. 3.
9. Остановка и завершение оптимизации.

Полная стоимость снижается в п. 4, где многим оценкам функции необходимы подпрограммы оптимизации.

Были выбраны шесть переменных (по одной для каждого фрагмента шва), каждая из которых может принять 12 нечисловых значений (6 в одном направлении и 6 для противоположном). Тривиальным решением очевидно является расчет всех возможных 46080 ($2^6 \cdot 6!$) комбинаций и выбор лучшего среди них. Тем не менее, это не представляется возможным, если учесть, что анализ с использованием МКЭ одного маршрута сварки занимает 32 ч.

Учитывая такие высокие вычислительная затраты, цель будет в оптимизации процесса с максимум 50 конечно-элементными расчетами. Большинство из доступных методов комбинаторной оптимизации, описанных в литературе, намного превышают это число, такие как: целочисленное программирование, теория графов, метод ветвей и границ, двоичные деревья и т.д. Таким образом, целью является снижение затрат на вычисления, путем построения суррогатной модели, которая потребует меньше усилий в вычислениях.

Суррогатная модель, изложенная в этой статье, обеспечивает быстрый и эффективный метод для представления дорогих в смысле вычислений КЭМ, которые могут быть использованы при решении комбинаторных задач маршрутов. Алгоритм постоянно обращается к существующим данным изучаемой системы посредством отображения дискретного нечислового набора информации для непрерывной числовой области. Модель оказалась быстрой и точной, и может быть использована в оптимизационных целях. Этот метод был применен к оптимизации маршрута сварки, и показал, что оптимальные послесварочные деформации

могут быть достигнуты уже через 28 расчетных шагов в МКЭ, из возможных 46080 комбинаций. Это значительно снижает вычислительные затраты, необходимые при планировании сварки, без существенной потери точности. Модель была адаптирована таким образом, чтобы его можно было использовать с любым объемом информации, что также позволяет использовать ее для динамического расширения настолько больше данных, сколько сделано доступными. Это подводит к интересной проблеме разработки оптимального динамического плана экспериментов для комбинаторных задач маршрутов. Авторы, подводя итоги пишут, что для более сложных пространственных задач, можно дать больший приоритет некоторым позициям или фрагментам шва, чем другим. В таких случаях, смешанный план экспериментов (Design of Experiment – DoE) возможен, где наиболее важные фрагменты шва привлечены вхождениями высших порядков, а менее важные фрагменты вхождениями более низкого порядка. Варьирование в этом смысле может привести к снижению размерности плана, давая наиболее полную информацию для более важных фрагментов.

Часто контроль над деформацией осуществляется эмпирически, с использованием экспериментов [48]. Набор экспериментов проводят в определенном диапазоне условий, и результаты экспериментов используются для определения набора параметров, которые тесно связаны с требованиями к соединению. К сожалению, этот тип экспериментального определения оптимального критерия не всегда гарантирует идеальную настройку или применимость к условиям исследуемой конструкции, и требует отдельной тарировки.

Разные исследователи разбирали проблему деформации при сварке с использованием МКЭ. В [40] автор представил обширный обзор остаточных сварочных напряжений и прогноз деформаций на КЭМ.

Развивая тему оптимальной технологии сборки-сварки авторы в [53] описывают эффективный подход к численной оптимизации параметров процесса дуговой сварки, который призван минимизировать деформацию в конструкциях, вызванную технологией. Разработана программная платформа численной оптимизации, базирующаяся на сочетании генетического алгоритма (ГА) и МКЭ, и приме-

ненная впоследствии на моделях с конечно-элементной сеткой низкого и высокого разрешений. Классический слабо совмещенный термомеханический анализ с термоупругопластическими предположениями осуществляется для прогнозирования деформаций математических моделей. Поиск оптимальных параметров процесса выполняется путем прямого интегрирования математических моделей и методики оптимизации на основе ГА. Разработанная программная платформа автоматически вставляет параметры сварочного процесса в имитационные модели, выполняет конечно-элементное моделирование сварки и оценивает выходные данные моделирования необходимые для итеративной эволюционной оптимизации. Результаты оптимизации показывают, что предложенный подход позволяет внести существенный вклад в повышение качества изготовленного сварного изделия, хотя лишь облегчается разработка изделия и его проектирование. Отметим отдельно, что данная методика реализовывалась на примере полноразмерной твердотельной модели сварного узла нижнего рычага амортизационной подвески колеса, в которой был промоделирован валик сварного шва внахлест, с имитацией «усиления» подобного реальному физическому шву. В прочностном расчете основными уравнениями являются уравнения равновесия, определяющие взаимосвязь «напряжение-деформация», и уравнения геометрической совместности апеллируя к [40]. Зависимость температуры от времени, полученная из термического анализа, вводится в виде тепловой нагрузки в КСС для расчета НДС. Изменение картины распределения температуры привносит деформацию в тело посредством его теплового расширения и влияет на свойства материала. Подсчитывается большая деформация и большие пластические деформации, и добавка декомпозиции упругой, пластической и тепловой деформаций используется для процесса разгрузки. В расчете используют обычную упругопластическую модель материала с критерием пластичности Мизеса.

Эффекты фазовых превращений не учитывались в данной работе [53]. Моделирование потока жидкого расплава также не включено, потому что эффект от потока на НДС может рассматриваться как пренебрежимо малый, ссылаясь на [22]. Авторы заключают, что оптимизация столь вариативного процесса сварки на

основе традиционных экспериментов исключительно дорога и не всегда гарантирует обеспечение комбинацией оптимальных параметров. Более того, такой подход также не может эффективно контролировать некоторые важные параметры, такие как направление сварки. В этом смысле, исследование, подобное этому, основанное на надежной системе численной оптимизации вместе с интегрированными вычислительными средствами, позволяет провести автоматическую оптимизацию параметров сварочного процесса без потребности в дорогих экспериментах. Система способна исследовать влияние нескольких проектных переменных, одновременно принимая во внимание ограниченность варианта имитационной модели. Кроме того, предлагаемый инструмент также будет полезным для выполнения проектных исследований на ранней стадии, как параметрического исследования, так и анализа чувствительности конструкции к проектным параметрам. Данное исследование также расширяет возможности автоматизированных и пользовательских приложений в процессе технологического проектирования, расчета и оптимизации. Наилучший результат найден ГА с деформацией на 41% меньше, чем в результате, полученном в исходном варианте. Данный пример иллюстрирует, как предложенная компьютерная система может быть переделана без существенных модификаций, если целью является компромисс между оптимальной конструкцией и стоимостью вычислений.

Хотя эффективность вычислений является критическим ограничением предложенной системы, сочетающей ГА и МКЭ, очевидно, что методика весьма уверенно приближается к точке оптимума. Чтобы увеличить вычислительную эффективность разработанной системы можно интегрировать систему на дополнительных мощностях, распараллеливая вычисления на них. Рассмотрение дополнительных проектных переменных, таких как: позиция технологических прижимов, время их установки/снятия и время охлаждения между выполнением фрагментов шва также может быть среди тем будущих исследований.

В ранее упомянутой работе [46] автор рассмотрел метод структурно-параметрической оптимизации конструкций несущих поверхностей малого удлинения. Под структурой конструкции там принималось конкретное КТР. Выбор

наилучшего КТР производится в результате решения оптимизационной задачи идентификации альтернативных конструкторско-технологических решений с предварительно найденным эталоном, представляющим собой оптимальное с точки зрения минимума массы распределение материала, удовлетворяющее требованием прочности и аэроупругой устойчивости. Приводится пример решения задачи структурно-параметрической оптимизации конструкции крыла малого удлинения.

В [54] был предложен метод выбора оптимальных параметров трехслойных сотовых конструкций при осевом сжатии. Условия устойчивости и конструктивно-технологические ограничения формулируются в виде неравенств. Проектировочный расчет сводится к решению задачи нелинейного программирования, где целевой функцией является вес сотовой панели. Приведены результаты исследования влияния начальных деформаций и некоторых конструктивно-технологических требований на оптимальные параметры конструкции.

В статье [55] представлена модель и методика оптимального проектирования неметаллической, композитной оболочки типа отсека корпуса ЛА при сложном термосиловом статическом и динамическом нагружении. В качестве метода оптимизации выбран модифицированный метод проекции градиента. Варьируемыми параметрами выбраны: количество слоев оболочки и угол намотки стекловолокна. Постановка проектировочной задачи заключается в выборе оптимального варианта конструктивно-технологического решения и определения конструктивных параметров цилиндрической композиционной оболочки из условия минимума массы рассматриваемой конструкции. В результате оптимизационных процедур получены зависимости конструктивных параметров оболочки от параметров внешнего термосилового нагружения. Показано, что с ростом величины внешнего давления, осевого сжатия, увеличиваются значения конструктивных параметров, и как следствие, возрастает и масса оболочки.

В [16] решались задачи рационального проектирования стержневых систем. В частности, авторами изящно была решена модельная задача, в которой имитировали тонкостенную конструкцию кессона крыла или фюзеляжа с промежуточ-

ной опорой переменной жесткости, и исследовали несущую способность всей конструкции по критерию максимизации $P_{крит}$. Рассмотрение подобных примеров основывается на решениях задач устойчивости различных упругих стержневых наборов, изложенных в [56, с. 146]. Там же были учтены и проанализированы влияние начальной погиби и продольно-поперечного изгиба на «критическую жесткость», как начальных (исходных) несовершенств конструкции, подвергаемой сварке. К этим несовершенствам могут быть отнесены деформации, вызванные остаточными напряжениями при сборке-сварке, рассматриваемыми в данном диссертационном исследовании. Указанным работам несколько вторит [57], сравнивая уже известные точные решения устойчивости упругого стержня с решениями, полученными вариационными методами Ритца-Тимошенко и Бубнова-Галеркина.

С учетом вышеизложенного можно заключить, что проблемы конструктивно-технологического проектирования рациональных сварных конструкций рассматривалось во многих источниках [29], [34], [48], [51], [52], [53]. Широко освещены вопросы оптимизации технологической части процессов проектирования. Однако, анализ текущего состояния показал, что при общей проработанности вопроса в машиностроении и судостроении [29], [53], [58], [59] *показал существенную неполноту методологической базы для проектирования пространственно-сложных сварных конструкций сверхзвуковых самолетов*. Особенно, не наблюдается классификации и широкого использования в качестве объекта исследования объемных отсеков сварных конструкций. Также отсутствуют рабочие математические модели авиационных сварных агрегатов, работающих в условиях комбинированного нагружения, которые обеспечивали бы учет конструктивно-технологических факторов на стадии проектирования таких конструкций.

1.2 Роль и место сварных отсеков в авиационных конструкциях

При обобщающем анализе отечественного [1], [60], [61], [62] и зарубежного [63] опытов в проектировании, создании и эксплуатации сварных конструкций в целом, и для сверхзвуковых самолетов, в частности, выяснилось, что требуется формализация, классификация объекта исследования – сварного отсека и его позиционирование в иерархии систем авиационных комплексов методами системного анализа [64], [65]. Согласно ГОСТ 21890-76, отсек – часть самолета, предназначенная для выполнения определенных функций [66].

В работе [67] проведена декомпозиция сложной системы сверхзвукового авиационного комплекса (АК) и определено место сварных отсеков в системе конструкции планера самолета и их членение (Рисунок 1.1). Как видно, сварной отсек, как объект исследования, является подсистемой для планера самолета и надсистемой для элементов конструкции самого отсека.

Классифицируя сварные отсеки по их назначению, разделим их на **основные** и **вспомогательные**. **Основные** отсеки размещают в себе целевую нагрузку, топливо или экипаж (Рисунок 1.1). При их выделении в отдельный класс монолитных конструкций целесообразно отнести **основные** сварные отсеки к отдельному классу по характерному признаку – «герметичность». При сборке монолитных (сварных) конструкций герметичность достигается применением сварки с непрерывным швом (АрДЭС, ЭЛС, лазерная и плазменная сварки, а некоторых случаях, РЭС). Для **вспомогательных** отсеков, вмещающих, например, бортовое оборудование, не требуется обеспечения полной герметичности (иногда речь здесь идет о пыле-, влагозащищенном отсеке). При сборке отсеков такого типа применяют точечную (ТЭС), роликовую электросварки (РЭС) или сварку (Ар)ДЭС прерывистым швом.

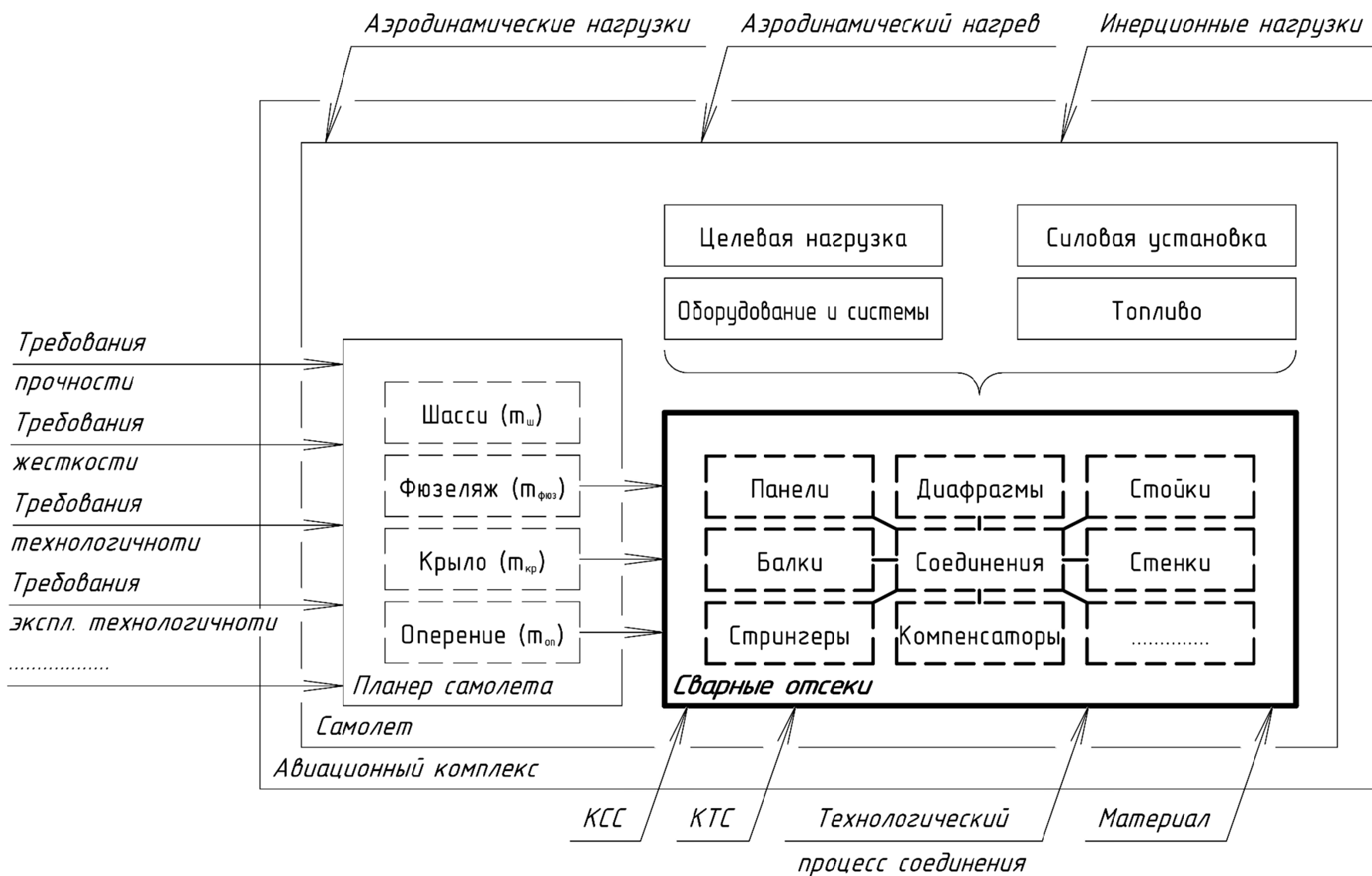


Рисунок 1.1 – Иерархия систем и место в них систем сварных отсеков [67]

Впервые вопрос о проектировании габаритных цельносварных конструкций в отечественной сверхзвуковой авиации возник при разработке истребителя МиГ-25 (первый полет в 1964 г.), затем при разработке истребителя-перехватчика МиГ-31 (первый полет в 1975 г.) [1], [68]. В сварной конструкции МиГ-25 (Рисунок 1.2) были в основном использованы высокопрочные свариваемые стали новых, для тех лет, марок – Х15Н5Д2Т (ВНС-2, ВНС-2УШ), 13Х15Н4АМЗ (ВНС-5), 08Х17Н5МЗ (СН-3), ЭИ878 и т.п.

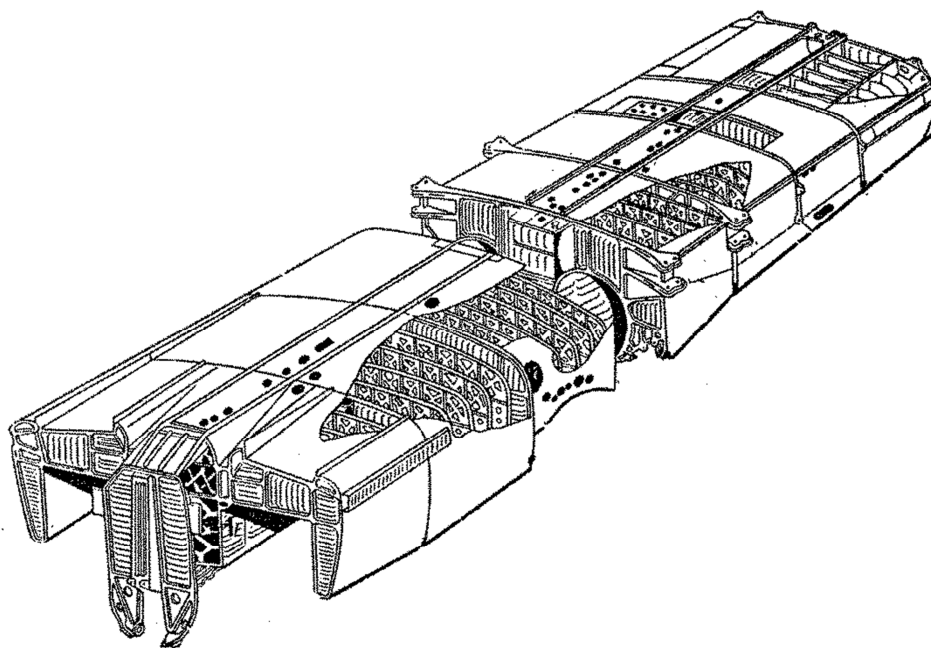


Рисунок 1.2 – Цельносварные конструкции агрегаты-секции самолета МиГ-25 [1]

Доля стальных сварных конструкций для МиГ-25, -31 составляет 70% и 50% соответственно. Основой фюзеляжа и всего МиГ-25 является топливный бак-отсек, который представляет собой монолитную сварную конструкцию, состоящую из отдельных герметичных баков. Каждый бак в отдельности состоит из герметичных шпангоутов, наружных и внутренних панелей. Герметичные шпангоуты (кроме торцевых), в свою очередь, являются общими для двух смежных баков. К моменту создания МиГ-31 был накоплен большой опыт серийного производства и эксплуатации МиГ-25. Поэтому появилась возможность уточнить перечень и объемы применяемых материалов. В сварной части конструкции МиГ-31 (Рисунок 1.3) доля сталей была снижена за счет более широкого использования алюминиевых и титановых сплавов [1].

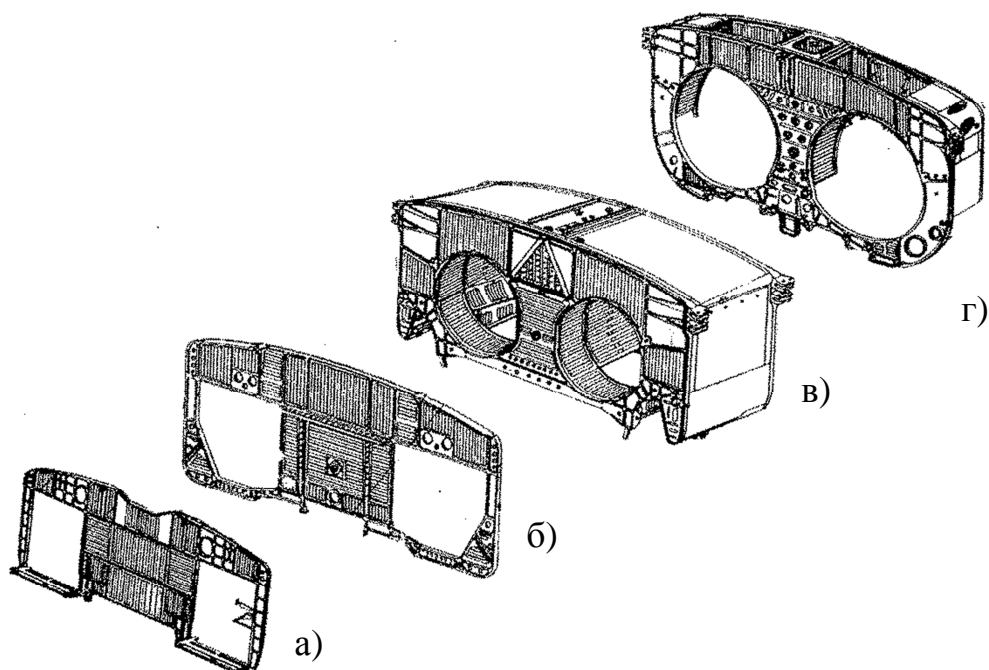


Рисунок 1.3 – Отдельные цельносварные шпангоуты (а, б) и цельносварные отсеки фюзеляжа (в, г) сверхзвукового самолета МиГ-31 [1]

В США был создан сверхзвуковой серийный самолет-разведчик SR-71, совершивший первый полет в 1964 г. (Рисунок 1.4). Его сварная конструкция состояла на 93% из титанового сплава [69].

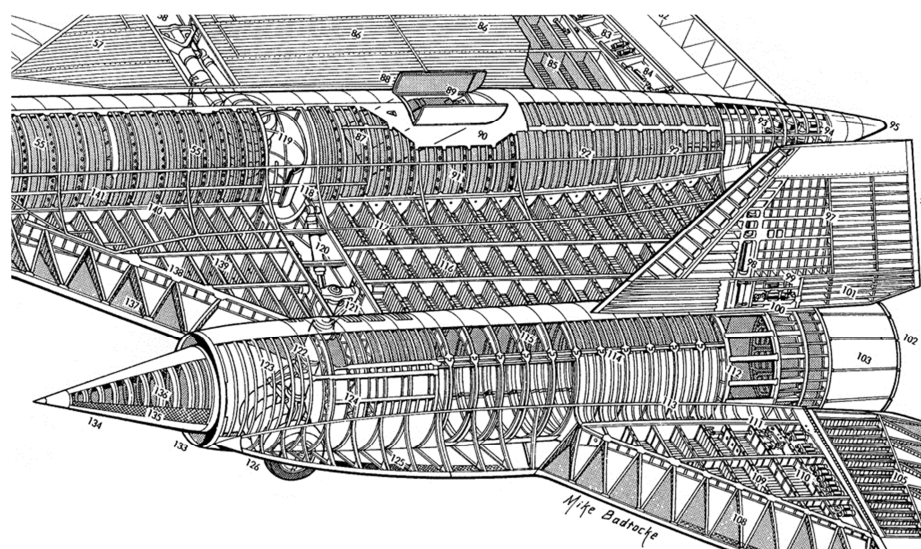


Рисунок 1.4 – Фрагмент конструктивно-компоновочной схемы самолета SR-71

В мировой истории гражданской авиации были реализованы только 2 проекта коммерческих сверхзвуковых пассажирских самолетов (СПС) – советский Ту-144 (первый полет в 1968 г.) и европейский Concorde (первый полет в 1969 г.). Они имели схожие аэродинамические и конструктивные компоновки [62, с .332].

В отечественном варианте СПС доля сварных титановых конструкций составляла около 20% (Рисунок 1.5).

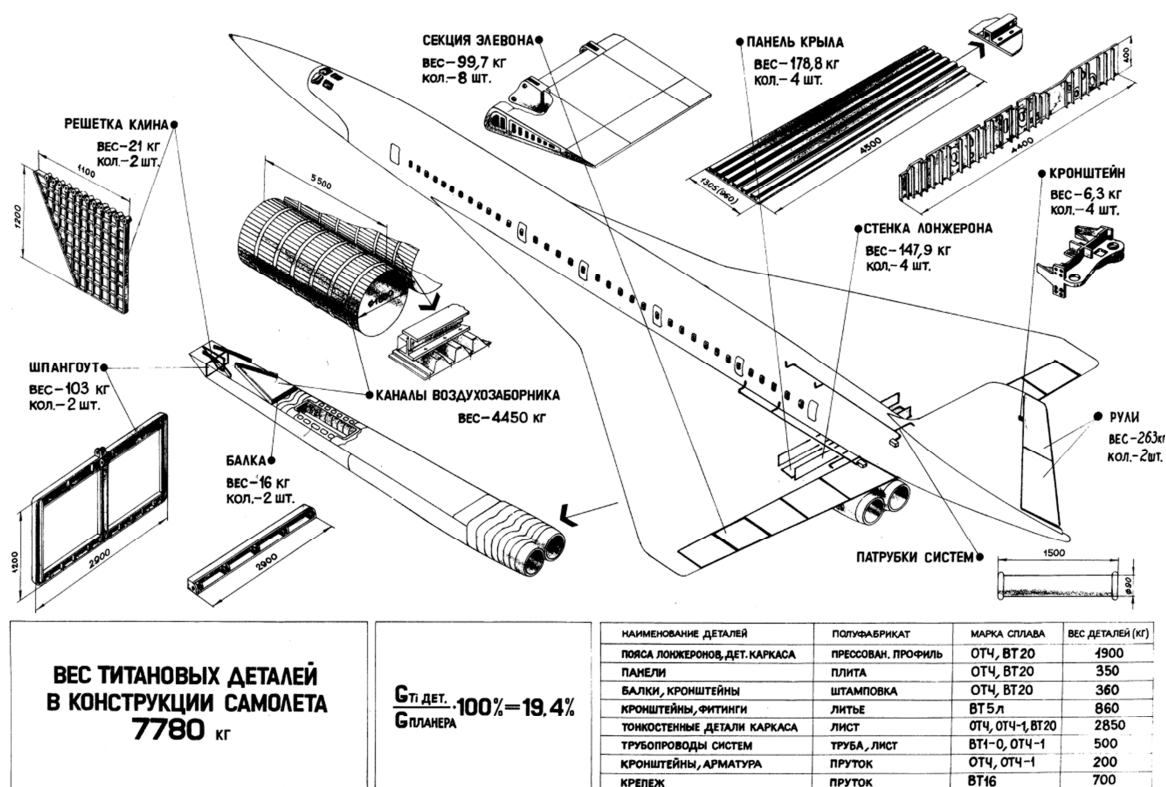


Рисунок 1.5 – Применение титановых сплавов в конструкции Ту-144 [62]

Сейчас также оценивается возможность создания СПС 2-го поколения, в том числе ЛА малой размерности для бизнес-авиации – сверхзвуковых деловых самолетов (СДС), в конструкциях которых планируется использование перспективных свариваемых алюминиевых сплавов [63].



Рисунок 1.6 – Некоторые концепции СДС [63]

В системе сварного отсека сверхзвукового самолета (Рисунок 1.1), работающего в условиях высоких температур, подсистемой, объединяющей все элементы в единое целое, является сварное соединение – шовное или точечное. Следовательно, при проектировании сварной конструкции важно учитывать их положение и размерность. Учет зон термического влияния (ЗТВ) следует осуществлять таким образом, чтобы они включали в себя шов и околошовную зону. Размеры ЗТВ, в общем случае, могут определяться экспериментально [30, с. 45], [70] на шлифах образцов-свидетелей (Рисунок 1.7) по имеющимся границам фазовых преобразований. Также могут быть применены эмпирические методики для расчета размерности таких зон [19, с. 79], [34, с. 146].

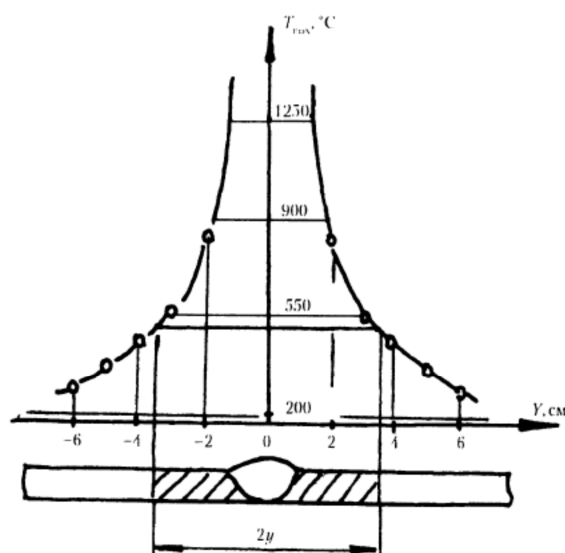


Рисунок 1.7 – К экспериментальному определению ЗТВ [58]

Проведем системный анализ на уровне объекта исследования. На Рисунке 1.8 изображена функциональная схема системы сварного отсека. Видно, что факторы, ранее рассматриваемые изолированно и разрозненно, теперь сгруппированы во множества конструктивно-технологических факторов u и внешней среды v . Введено множество ω , связывающее массу конструкции со сварным отсеком посредством оператора модели F . Множество ω будет выступать первоначальным критерием в аналитическом исследовании.

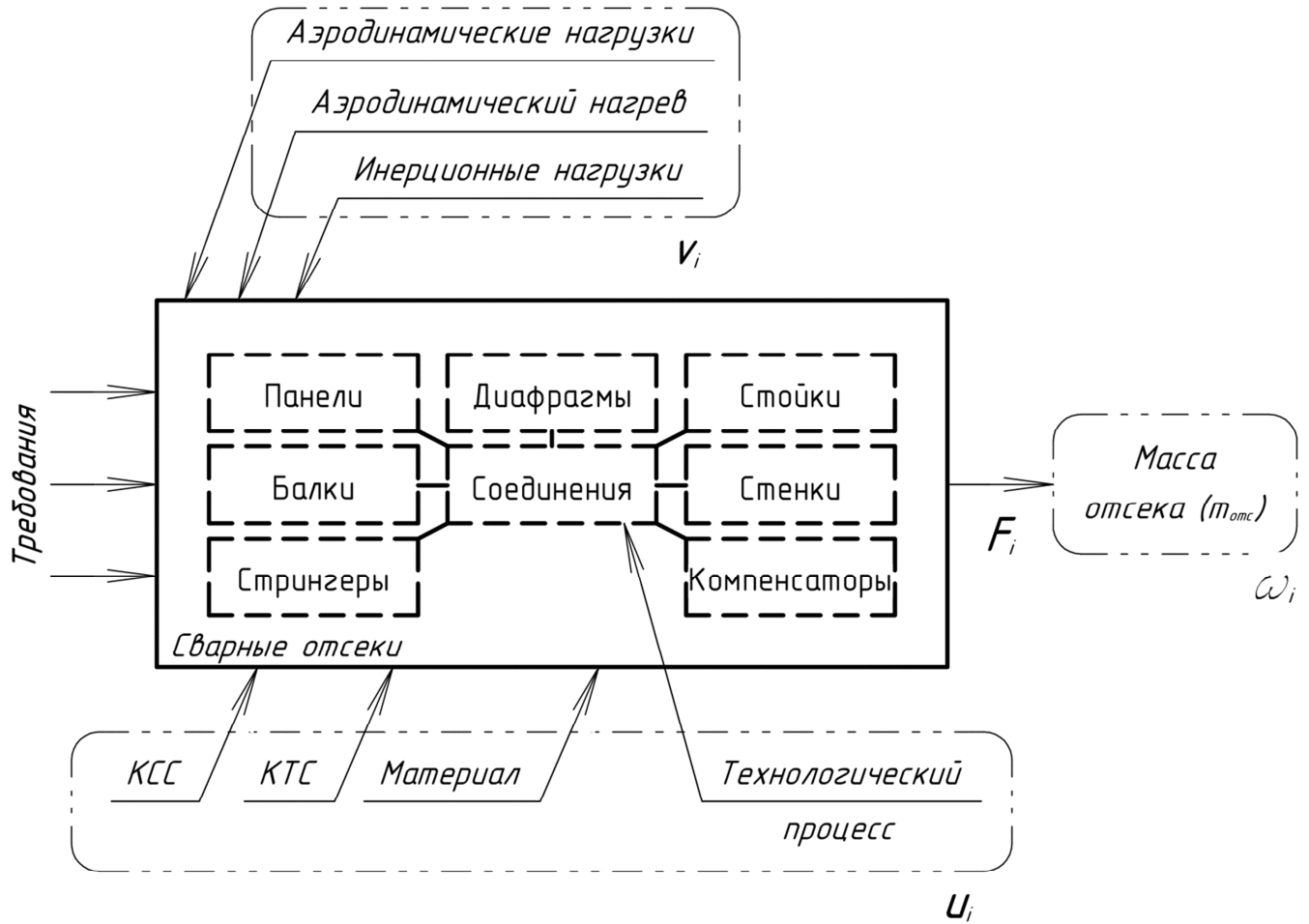


Рисунок 1.8 – Функциональная схема системы сварного отсека

Опишем исследуемую систему объекта исследования – сварного отсека в формализованном виде:

$$\begin{aligned}
 \omega &= |\omega_k|_K = |\omega_k(u_i, v)|_K \\
 u_i \in U &\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \boxed{F_i(u_i, v_i)} \rightarrow \omega_i(u_i, v_i) \\ \vdots \quad \dots \\ \boxed{F_k(u_k, v_k)} \rightarrow \omega_k(u_k, v_k) \end{array} \right\} \Omega_k, \\
 k &= \overline{1, K}
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

где:

k – номер показателя эффективности (критерия), K – сумма критериев;

ω_i – критерий эффективности отдельного сварного отсека;

u_i – альтернатива сварного отсека (вариант КТС), i – номер итерации;

v_k – внешняя среда (внешние воздействия);

F_i – оператор модели (метод расчета);

Ω_k – множество мат. моделей (векторный показатель эффективности).

В рассматриваемом случае за критерий эффективности ω i -ой КТС выбранного сварного отсека принята минимизация его массы m_i . При этом масса отсека будет функцией суммы масс, входящих в сварной отсек элементов при обеспечении требований прочности, жесткости и т.д. Таким образом, формула массы отсека (целевая функция) запишется в виде частного критерия оптимальности:

$$M_{отс}(u_i)|_{u \in U} = M_{каркаса} + M_{панелей} = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot \rho_i \cdot F_i \cdot l_i + \sum_{j=1}^n \beta_j \cdot \rho_j \cdot S_j \cdot \delta_j, \quad (1.2)$$

где:

$M_{каркаса}$ – масса длинномерных, профилированных элементов каркаса сварного отсека (стоек, поясов балок и т.п.);

$M_{панелей}$ – масса оболочечных тонкостенных элементов конструкции сварного отсека (панели, стенки, обшивки и т.п.);

α, β – весовые коэффициенты;

ρ – плотность материала элемента конструкции;

F, l – площадь поперечного сечения элемента каркаса и его длина, соответственно;

S, δ – площадь поверхностного, панелированного элемента конструкции и его приведенная толщина, соответственно.

1.3 Классификация сварных отсеков

Проведенный в подразделе 1.2 анализ авиационных систем сверхзвуковых самолетов показал, что подавляющее большинство аэродинамических компоновок сверхзвуковых ЛА выполнены в рамках концепции Кейли [71, с. 123], и, следовательно, формообразование отсеков таких ЛА восходит к назначению агрегата, тем самым упрощая формализацию (идеализацию) объекта исследования. Среди сварных конструкций сверхзвуковых самолетов можно выделить такие, кото-

рые по своей форме и геометрии близки телам параллелепипеда, цилиндра или их комбинации (Рисунок 1.9).

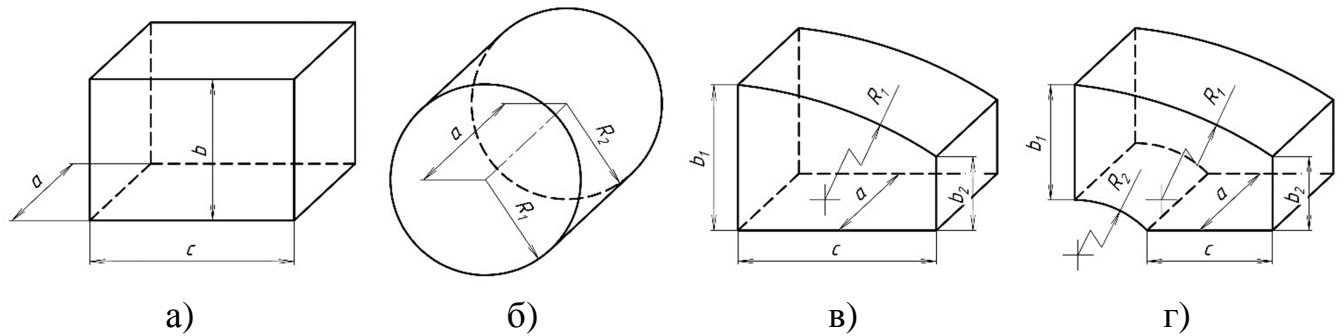


Рисунок 1.9 – Формообразование типовых отсеков: а) параллелепипед (частный случай призмы); б) цилиндр (частный случай конуса); в), г) комбинации «параллелепипед + цилиндр»

Исходными (входными) данными для данного множества геометрических моделей альтернатив сварных отсеков являются: количество и тип элементов силового набора, параметры сечений (F , J_i и т.д.) элементов, приходящих на сборку-сварку отсека и их жесткостные характеристики (EF , EJ_i , GF и т.п.), связанные с заданными моделями материалов.

Рассматриваемые конструкции сверхзвуковых самолетов относятся к тонкостенным конструкциям, имеющим несущую (силовую) обшивку, подкрепленную продольным и поперечным силовыми наборами. С точки зрения передачи нагрузок и подкрепления, различают **монокок** и **полумонок**. По способу преобразования внешних нагрузок во внутренние силовые факторы в регулярной (силовой) части конструкции делятся на **ферменные**, **балочные** и **смешанные**. Последние имеют в своем силовом наборе элементы силового набора первых двух типов. Отметим, что невозможен переход от конструкции **ферменных** сварных отсеков к **балочной** конструкции изменением только лишь количественных значений параметров и характеристик элементов его составляющих, и соответственно, требует качественных изменений в составе силового набора. Таким образом, все многообразие типовых конструкторских решений и в случае сварных отсеков является дискретным множеством.

Классификация сварных отсеков с точки зрения сборки-сварки таких конструкций подразумевает два типа отсеков (секций): **компенсационные** или **некомпенсационные**.

Для отдельных **некомпенсационных** отсеков (Рисунок 1.3 в, г), или входящих в состав агрегата – секций, процесс сборки-сварки происходит в стапелях, при этом элементы-узлы, свариваемые по отдельности, обладают конечной жесткостью. Их обводы при окончательной сборке-сварке отличаются от теоретических форм. В качестве упрощающей гипотезы выдвинем предположение о пренебрежимо малых значениях таких изменений. При сварке таких отсеков можно пренебречь усадкой и деформацией, поскольку есть возможность полученный агрегат подвергнуть методам, «смягчающим» внутренние монтажные напряжения. Для этого сварной отсек помещают, например, в печь для отпуска, с целью снижения послесварочных остаточных напряжений [27, с. 126]. Полученная жесткость каркаса и входящих сборочных элементов будет учтена в математической модели.

Предположим следующую технологию последовательности сборки-сварки таких отсеков:

1. На первом этапе сваривается каркас будущего отсека, состоящий из протяженных длинномерных силовых балочных деталей, преимущественно из профилей с тавровым, уголковым или крестообразным сечениями (см. Приложение А).
2. Во втором этапе на общую сборку подаются листы (гофрированные или плоские стенки, штампованные панели), панели с присоединенными к ним стрингерами, которые привариваются к каркасу сварного отсека в порядке, предусмотренным директивным технологическим процессом (ДТП).

Для **компенсационных** отсеков-секций (Рисунок 1.10) стапелем является конструкция ранее собранного агрегата или их группы. Как видно из Рисунка 1.10 технология сборки-сварки для такого типа отсеков отличается от предыдущей отсутствием п. 1. Согласно своему названию, такой отсек является компенсатором, т.е. выбирает неточности установки готовых агрегатов в общем стапеле более

крупного цельносварного агрегата (изделия). Невозможность или чрезвычайная сложность устранения послесварочных деформаций и поворотов для таких габаритных сварных изделий приводит к поиску оптимального порядка наложения завершающих монтажных швов в **компенсационных** отсеках. Это является частью предмета исследования – методика проектирования оптимальных КТС.

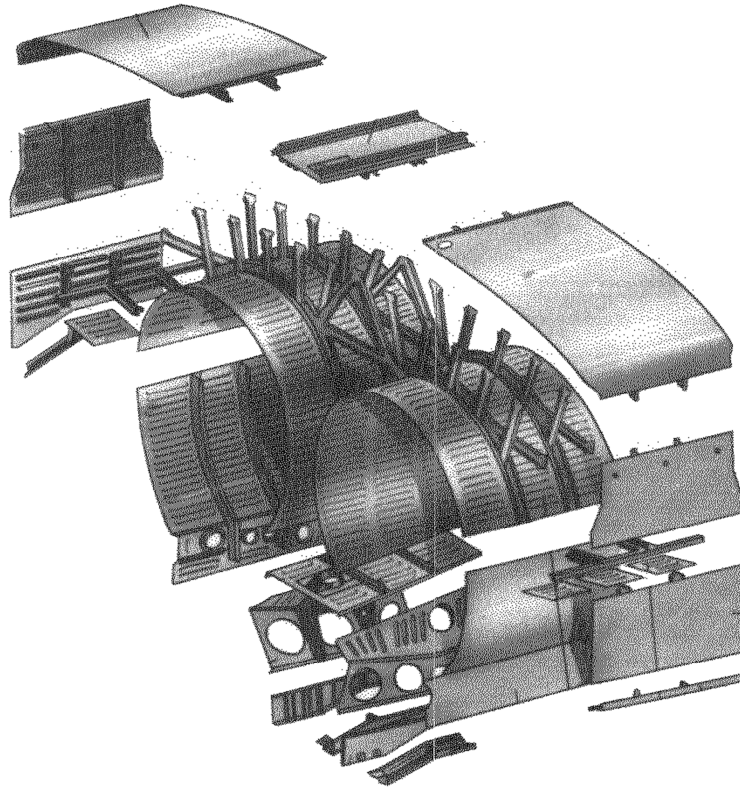


Рисунок 1.10 – Пример компенсационного сварного отсека

На основании вышеизложенного необходимо разработать *новую методику проектирования сварных конструкций сверхзвуковых самолетов, посредством создания расчетных моделей сварных отсеков, учитывающих конструктивно-технологические особенности таких конструкций*. Такие модели позволят учесть многие факторы на стадии проектирования конструкции, рассматриваемые прежде по отдельности на разных этапах ее создания. Ведь, как было показано в аналитическом исследовании современного состояния проблематики, технологию сборки-сварки пытаются оптимизировать на уже разработанных, принятых к серийному производству сборках. Также отметим, что система сварного отсека имеет в своей основе как количественные, так и качественные переменные. Созданная модель сварного отсека нагружается эксплуатационными или расчетными

нагрузками и исследуется НДС отсека от влияния разных конструктивно-технологических факторов.

Из первой главы сделаны следующие выводы:

1. В анализе определено местоприложение методики создания оптимальных (рациональных) конструкций сварных отсеков сверхзвуковых самолетов с учетом конструктивно-технологических схем. Декомпозиция современного состояния проблем конструктивно-технологического проектирования показывает, что с помощью существующих методик без проблем решаются задачи расчета сварных конструкций, имеющих уже утвержденное и эксплуатируемое конструкторско-технологическое решение. Их оптимизация является тривиальной как с точки зрения обеспечения критерия равнопрочности, так и с позиции более сложного выбора оптимального маршрута сборки-сварки для обеспечения минимальных монтажных усилий.
2. Применение существующих методик затруднено при решении задачи выбора рациональной конструкции на стадии проектирования конструкции сварного отсека сверхзвукового самолета без создания математической модели и рабочей методики оптимизации.
3. Эффективность существующих методик можно увеличить с учетом технологических факторов, поскольку пренебрежение на данном этапе приводит к усложнению отработки конструкции при ее подготовке к производству, и к удорожанию всего изделия в целом. Таким образом, поставленная задача по учету указанных факторов на этапе проектирования сварных отсеков сверхзвуковых самолетов решается при создании новой расчетной модели и модифицированной методики ее оптимизации. Они учитывают: модели материалов, технологию сборки-сварки и ее последовательность, КСС и т.п.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Проведенное в предыдущей главе аналитическое исследование выявило необходимость разработки новой методики. Такая методика позволяет проектировать оптимальные (рациональные) сварные отсеки сверхзвуковых самолетов с учетом их конструктивно-технологических схем. Новым, с точки зрения проектирования сварной конструкции и последующей ее оптимизации, является методика, позволяющая получать рациональные конструкции с учетом технологических факторов – ЗТВ и остаточных напряжений в них. Предварительно следует определить местоположение проектируемого сварного отсека, исходя из первоначальной геометрии аэродинамических обводов и КСС ЛА. Далее следует определить перечень требований и ограничений его возможной классификации, принимая во внимание его функциональное предназначение и ранее заданное положение. Когда известна геометрия и положение ($S, l = const$), можно перейти к определению нагрузок (Q_i, M_i). Для излагаемой методики эти нагрузки могут быть предварительно заданными, а могут быть получены из эпюр. Порядок действий по новой методике приведен на Рисунке 2.1. Этот порядок следует из логической последовательности действий конструктора/проектировщика при создании и расчете любой новой конструкции по существующим методикам [72]. Рассмотрим блок-схему более подробно.

2.1 Общая структура методики

Блок 1 состоит из задачи по идеализации проекта разрабатываемой конструкции сварного отсека посредством создания математической модели его конструкции с привлечением геометрической модели. Значения входных геометрических параметров КСС отсека (F, l, S, δ) могут быть получены: из проектировочного расчета на прочность конструкции по методу приведенных толщин, из опыта

инженера-конструктора при создании предшествующих вариантов конструкций, из чертежей конструкции существующего отсека, в случае, когда поставлена цель оптимизации ранее разработанного изделия.

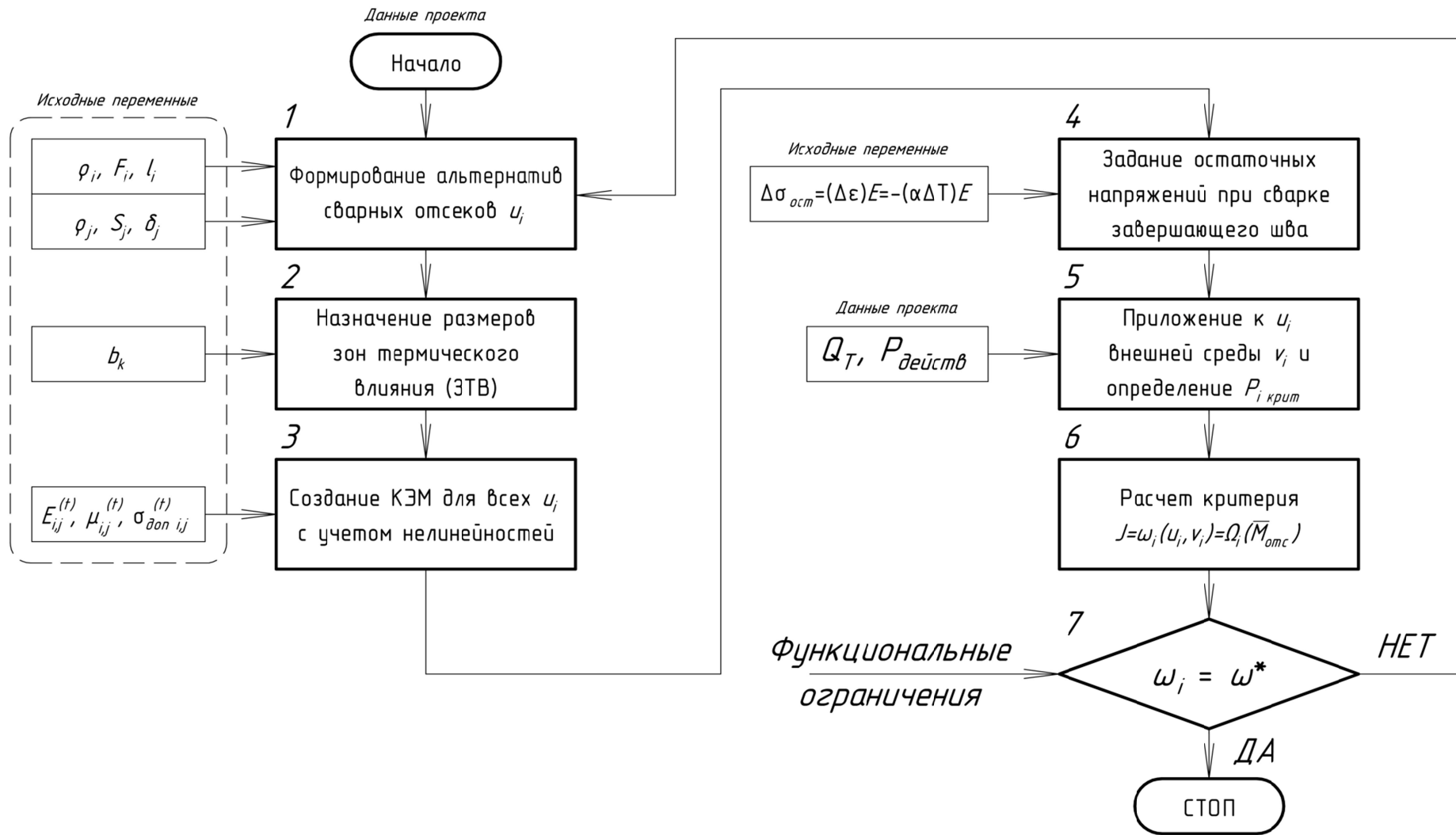


Рисунок 2.1 – Структурная схема алгоритма проектирования и оптимизации сварного отсека с учетом его КТС

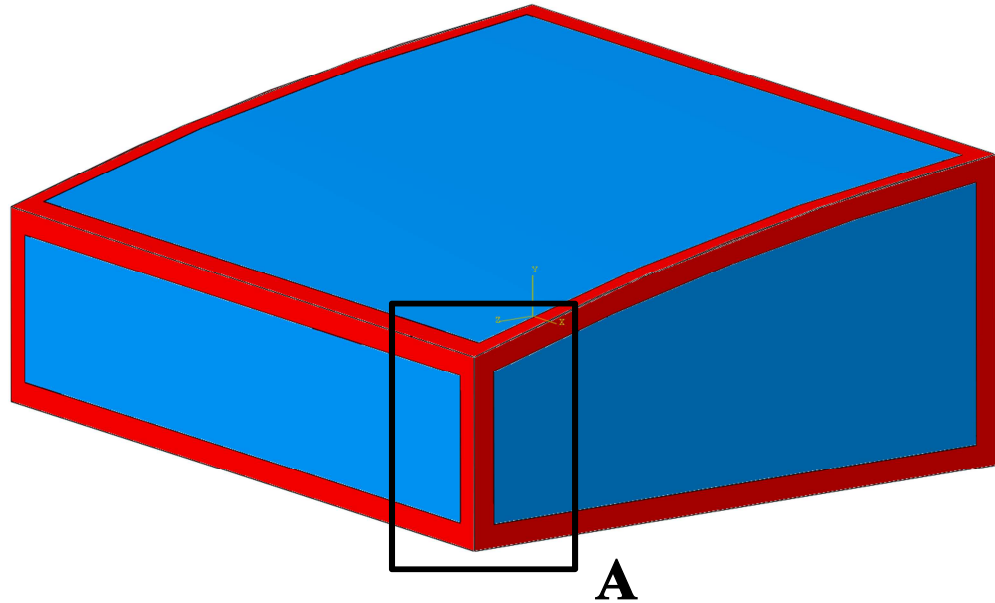


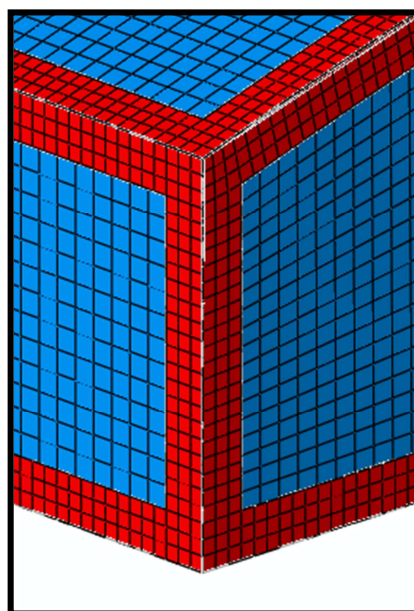
Рисунок 2.2 – Пример геометрической модели внешнего контура сварного отсека. Красные зоны, прилегающие к ребрам модели отсека – ЗТВ [67]

Как видно из представленного алгоритма проектирования и оптимизации, учет новых факторов (технологических) вводится в **блоках 2 и 4**.

2.2 Формирование конструктивно-технологической схемы

Блоки 1 и 2 формируют дискретное множество КТС сварных отсеков. Для данных этапов характерен *синектический* подход при генерировании альтернатив систем сварных отсеков, входящих во множество U . На это множество, разумеется, наложены ограничения. Параметрическими ограничениями для конкретного сварного отсека являются: геометрические размеры теоретического контура отсека, толщины (δ), площади (S , F) конструктивных элементов в заданном диапазоне. Функциональными ограничениями могут являться требования к жесткости (Рисунок 2.1), например, допустимые значения прогибов f . Предельные значения прогиба важны в качестве ограничений, поскольку при определенном его значении заданные нагрузки могут измениться. Это следует из классификации задач прикладной механики, когда прямая задача расчета на прочность превращается в задачу с обратной связью, т.е. в задачу из области механики, связанной с аэроупругостью.

В блоке 3 формируются КЭМ всех альтернатив КТС выбранного сварного отсека. Геометрическая модель, полученная на этапе **блоков 1 и 2**, вносится в сеткопостроитель расчетного программного обеспечения, основанного на МКЭ (ABAQUS [48], [51], [73]; ANSYS [43]; NASTRAN и т.п.). Элементы каркаса сварного отсека и поперечные подкрепляющие стойки, если таковые имеются, моделируются балочными конечными элементами с заданными свойствами поперечного сечения и их ориентированностью (F , J_p , $W_{изг}$ и т.д.). А элементам конструкции, относящимся к плоским деталям (панели, стенки и т.п.), назначаются оболочечные конечные элементы. *Для верификации расчетов по МКЭ следует проводить анализ НДС сварного отсека с разной плотностью конечно-элементных сеток. Иными словами, применяя данную методiku, следует создать и рассчитать 3-4 КЭМ для каждой альтернативы отсека.* В методике классического расчета конструкций этот блок опускается, ввиду большой сложности и количества ручных вычислений при использовании аналитического численного решения по МКЭ. Для вычислений в этом случае применяют «классические» методы расчета тонкостенных конструкций [9], [10], [11], в том числе по методу приведенных толщин панелей.



A

Рисунок 2.3 – Пример КЭМ сварного отсека (зона А, см. Рисунок 2.2). Балочные конечные элементы для деталей каркаса не визуализированы. Красными оболочечными конечными элементами обозначены ЗТВ

2.3 Учет нелинейностей

Для создания КЭМ необходимо иметь характеристики конструкционных материалов (E, μ, ρ), в том числе теплофизические (α, C_p, k). Следует отдельно отметить, что необходимо учитывать нелинейности в КЭМ сварных отсеков. Различают следующие типы нелинейностей:

- *геометрическая нелинейность* имеет место, когда перемещения конструкции вызывают значительное изменение его геометрии. В нашем случае, это может быть актуально, если рассматривается допустимость закритической работы отдельных элементов конструкции сварного отсека. При расчете по МКЭ ее учет не представляет сложности, но при расчете классическими методами требуется дополнительные значительные вычисления. И поэтому, в существующей конструкторской практике учетом геометрической нелинейности пренебрегают.
- *физическая нелинейность* обусловлена нелинейными свойствами материалов, в том числе, изменением их характеристик под влиянием температуры. В разрабатываемой мат. модели сварного отсека эта нелинейность определяется моделью материала (идеально-упругий материал, упруго-пластичный с упрочнением, нелинейно-упругий, идеально пластический и т.п.). Аналогично предыдущему пункту, учет физической нелинейности весьма затруднителен при расчете по классическим методикам проектирования конструкций.
- *конструктивная нелинейность* присуща конструкциям, находящимся в процессе монтажа (сборки), когда создаются новые связи, или, при разрушении, когда некоторые связи обрываются. В КЭМ сварного отсека, такая нелинейность будет учтена, если, как указывалось выше, будут правильно заданы граничные условия, определен возможный контакт (связь) между элементами конструкции сварного отсека в процессе нагружения и деформирования отсека, а также учтено влияние ЗТВ.

2.4 Учет технологических особенностей

Важной частью всей методики является учет технологических аспектов в **блоках 2 и 4**. Учет происходит через выделение ЗТВ (**блок 2**) и назначением остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ (**блок 4**) в этих зонах в соответствии с предусматриваемой директивной технологией сборки-сварки. Величина назначаемой ЗТВ связана с типом сварки. Определение ширины ЗТВ b_k для (Ар)ДЭС происходит по методикам, изложенным в [22, с. 108], [30, с. 79, 90], [34, с. 146]. Так, например, в соответствии с теорией быстродвижущегося источника тепла:

$$b_k = \frac{0,242}{c\gamma T_0} \cdot \frac{q}{v_c \delta}, \quad (2.1)$$

где:

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

γ – плотность материалов, кг/м³;

$c\gamma$ – объемная теплоемкость, Дж/(м³·К);

T_0 – температура сварки, К;

q – тепловая энергия источника сварки, Дж/с;

v_c – скорость перемещения источника тепла (скорость сварки), м/с;

δ – толщина деталей в месте накладываемого сварного шва, м.

Дифференцирование термических зон по размерам производится в соответствии с предлагаемыми технологиями сварки и маршрутом исполнения швов на начальном этапе проектирования всего изделия.

В **блоке 4** к ЗТВ прикладываем остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ посредством моделирования усадки шва, для которого берем значения необходимых температурозависимых характеристик конструкционного материала из **блока 3**: $\alpha^{(t)}$ – коэффициент температурного расширения, $E^{(t)}$ – модуль упругости. Величина градиента температуры ΔT сваренного шва может быть взята: из эксперимента, из статистики, из эмпирических зависимостей. В **блоке 4** учитываются технологические факторы: последовательность наложения сварных швов (маршрут) с завершаю-

щим монтажным швом, величины остаточных напряжений, связанные с ранее определенной технологией сборки-сварки (АрДЭС, ЭЛС и т.п.).

2.5 Блоки расчета

В блоке 5 происходит моделирование эксплуатационного нагружения отсека и наложения ограничений на КЭМ. К нагрузкам, как указывалось выше, относятся аэродинамические, инерционные и тепловые. При классическом (аналитическом) методе силового расчета конструкций они трансформируются в набор внутренних силовых факторов: нормальная сила N , перерезывающая сила Q_y , изгибающий момент M_z , крутящий момент $M_{кр}$, а также тепловой поток Q_T . При использовании МКЭ конструктор может сразу перейти от внешних нагрузок к расчету значений действующих эквивалентных напряжений. Однако, в реальной практике два этих подхода, как правило, комбинируют, применяя к КЭМ действие внутренних силовых факторов, поскольку рассматривают изолированный элемент конструкции с заданными граничными условиями. В нашем случае – это и есть объект исследования, сварной отсек. Таким способом раскрывается статическая неопределенность дискретизированной модели конструкции, которая при использовании «классических» инженерных методов для представленной идеализации заняла бы значительное время для вычислений.

Поскольку на сварной отсек наложены функциональные ограничения, например, допустимые прогибы (см. описание **блоков 1 и 2**), то для оценки вводим частный критерий оптимальности – критическая сила $P_{крит}$. В рамках МКЭ она рассчитывается методом Рикса («метод продолжающегося параметра») [74]. Поэтому критерий $P_{крит}$ запишем в неявном виде:

$$P_{крит}(u) \Big|_{u \in U} = f(\rho, F, l, S, \delta). \quad (2.2)$$

Формируем математические модели, входящие во множество Ω . На Рисунке 2.4 изображено пояснение к соотношениям между множеством мат. моделей сварного отсека Ω и задействованными множествами U и V .

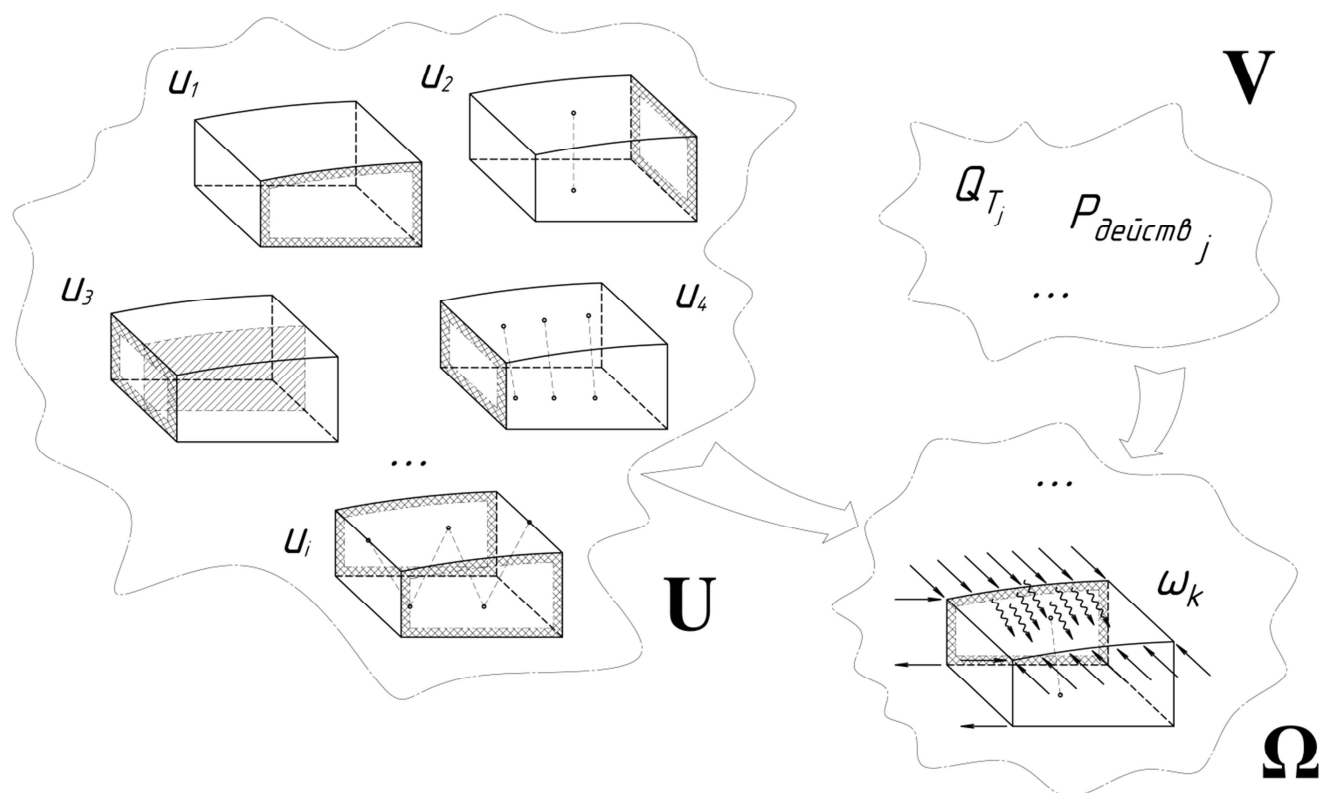


Рисунок 2.4 – Структурная схема алгоритма: **U** – множество КТС (двойной штриховкой обозначены ЗТВ), **V** – множество внешних воздействий, **Ω** – множество мат. моделей сварных отсеков

Блоке 6 рассчитывается критерий оптимальности и далее в **условном операторе 7** происходит его оценка.

Таким образом, учитывая (1.2) и (2.2), обобщенное решение (критерий оптимальности) для сварного отсека сверхзвукового самолета в заданной геометрии обводов (Рисунок 2.2) при многокритериальной неопределенности запишем следующим образом:

$$\begin{aligned}
 J = \max \{ & \bar{P}_{\text{крит}} / \bar{M}_{\text{омс}} \} \\
 \left\{ \begin{array}{l} S_{\min} \leq S_j \leq S_{\max} \\ l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max} \\ F_{\min} \leq F_i \leq F_{\max} \\ \delta_{\min} \leq \delta_j \leq \delta_{\max} \end{array} \right. & , \\
 \left\{ \begin{array}{l} M_{\text{омс}} \leq M_0 \\ y \leq f \\ \partial y / \partial P \geq 0 \end{array} \right. &
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

где:

$\bar{P}_{крит}$ – безразмерная величина приращения нагрузки $P_{крит} / P_0$;

$\bar{M}_{отс}$ – безразмерная величина массы сварного отсека $M_{отс} / M_0$;

f – ограничение прогиба для элементов каркаса;

$\partial y / \partial P \geq 0$ – функциональное ограничение, указывающее на необратимость

знака производной прогиба по приращению нагрузки.

Заметим, что при исключении из критерия (2.3) безразмерной нагрузки, получаем классическую задачу оптимизации конструкции по критерию массы (при прежних параметрических и функциональных ограничениях), который и рассматривается в данном диссертационном исследовании:

$$J = \min \{ \bar{M}_{отс} \}. \quad (2.4)$$

В функциональные ограничения переносятся также и критерии, описанные ниже.

В целом задача оптимального проектирования авиационных конструкций представляет задачу *структурно-параметрической оптимизации*. Структурная оптимизация на уровне выбора КСС и КТР представляется более неформальной, чем формализуемой. Возврат из **оператора 7** в **блок 1** происходит в целях уточнения КТС выбранного отсека, где важна инженерная интуиция, выраженная в операциях и процедурах с помощью методов принятия решения, эвристических алгоритмов. Качество созданной КТС сварного отсека в полной мере зависит от опыта и знаний исследователя, инженера-конструктора. Другими словами, не формализуется или формализуется слабо: в виде высказываний, простых схем и эскизов, являющихся языком выражения инженерной мысли. Таким образом, инженер-конструктор имеет возможность поменять КТС в части КСС: изменить параметры силовых элементов (**блок 1**), т.е. осуществить параметрическое исследование, или добавить/убрать элементы каркаса отсека, иными словами, произвести структурное изменение. В части управления технологическими особенностями, в КТС можно изменять маршрут сварки и положения монтажного шва, а также вли-

яния ЗТВ, т.е. технологию сборки-сварки (**блок 2**). Как следует из описанной методики синтеза новой схемы сварного отсека, существует много стратегий поведения конструктора при оптимизации таких схем. Однако, согласно правилу больших и сложных систем, при оптимизации следует руководствоваться ограничениями и критериями системы более высокого порядка. Например, если в случае оптимизации конструкции топливного бака балочная конструкция внешней стенки будет изменена на ферменную конструкцию, то практическая значимость результата ее оптимизации будет весьма сомнительна (при высокой теоретической значимости такого результата). Помимо прочего, на стадии **оператора 7**, может быть использован качественный критерий «собираемости» отсека. Для такого типа критерия, как уже упоминалось, доступна формализация в виде высказывания. Например, такого: для некомпенсационных отсеков критерием «собираемости» является то, что внешняя боковая панель (см. Рисунки 3.1, 3.22) должна быть последним вваренным элементом конструкции в директивном маршруте сборки-сварки. Уместно сказать, что используя существующих, реальных КТС, основываясь на практике существующих решений, может гарантировать успех при структурной оптимизации. Поскольку одновременное удовлетворение всех критериев невозможно, то в качестве главного количественного критерия выбрана относительная масса сварного отсека (2.4), а остальные переведены в функциональные ограничения.

Разработанная **методика проектирования сварных отсеков сверхзвуковых самолетов с учетом конструктивно-технологических схем в терминах системного анализа является комбинированной системой с полуавтоматическим управлением, включающей качественные и количественные переменные и позволяющей производить структурно-параметрическую оптимизацию**. Следует особенно подчеркнуть, что отличительной особенностью разработанной методики является учет технологических факторов.

По результатам второй главы сделаны следующие выводы:

1. Предложена блок-схема для проектирования или оптимизации конструкции сварного отсека сверхзвукового самолета с учетом КТС.

2. Предложен алгоритм действий, позволяющий учесть конструктивно-технологические факторы на стадии проектирования оптимального (рационального) сварного отсека сверхзвукового самолета.
3. Определены параметрические и функциональные ограничения при разработке конструкции сварного отсека.
4. Предложен обобщенный критерий оптимальности для оценки качества полученной КТС сварного отсека.

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНЫХ ОТСЕКОВ С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

3.1 Выбор расчетного отсека в конструкции сверхзвукового самолета

В качестве расчетного примера объекта исследования выбран сварной отсек фюзеляжа сверхзвукового самолета по конфигурации, сходный с примером из Главы 2 (Рисунок 3.1). Рассматриваемый сварной отсек расположен между соседними силовыми шпангоутами (по длине агрегата). По высоте ограничен членением боковой панели цельносварной секции агрегата (или верхней панели канала воздухозаборника), а в глубину (вдоль размаха) имеет размерность, соответствующую батоксу продольной балки-стенки.

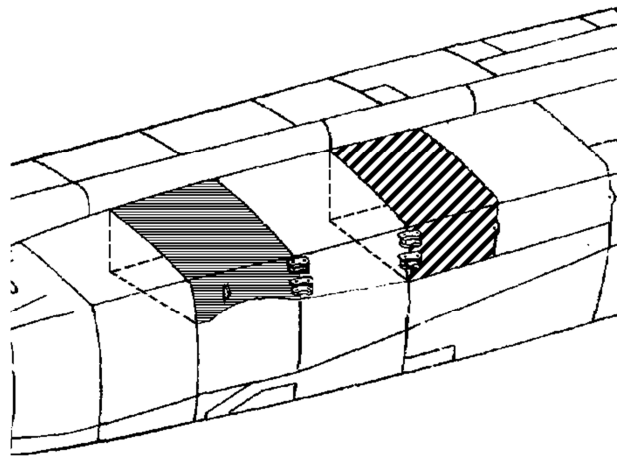


Рисунок 3.1 – Выделенные штриховкой зоны - типовые сварные отсеки фюзеляжа сверхзвукового самолета

Выбор таких расчетных зон обусловлен следующими причинами:

- выбранные зоны сварных отсеков выполняют разные функции (топливный бак, приборный отсек и т.п.) и, соответственно, отвечает разным требованиям;
- выбранная зона конструкции ограничена разными по своей природе поверхностями геометрических тел (цилиндр, параллелепипед), т.е. отражает

- сложную пространственную конфигурацию и может быть адаптирована для любой другой части конструкции планера;
- выбранная геометрическая конфигурация параметризуется в целях поиска оптимального сочетания конструктивно-технологических переменных;
 - выбранный отсек модифицируется под разные зоны нагружения (Рисунок 3.2);
 - исследуемые зоны могут быть отнесены как к компенсационным, так и некомпенсационным сварным отсекам цельносварного агрегата, в зависимости первоначально заданного ДТП.

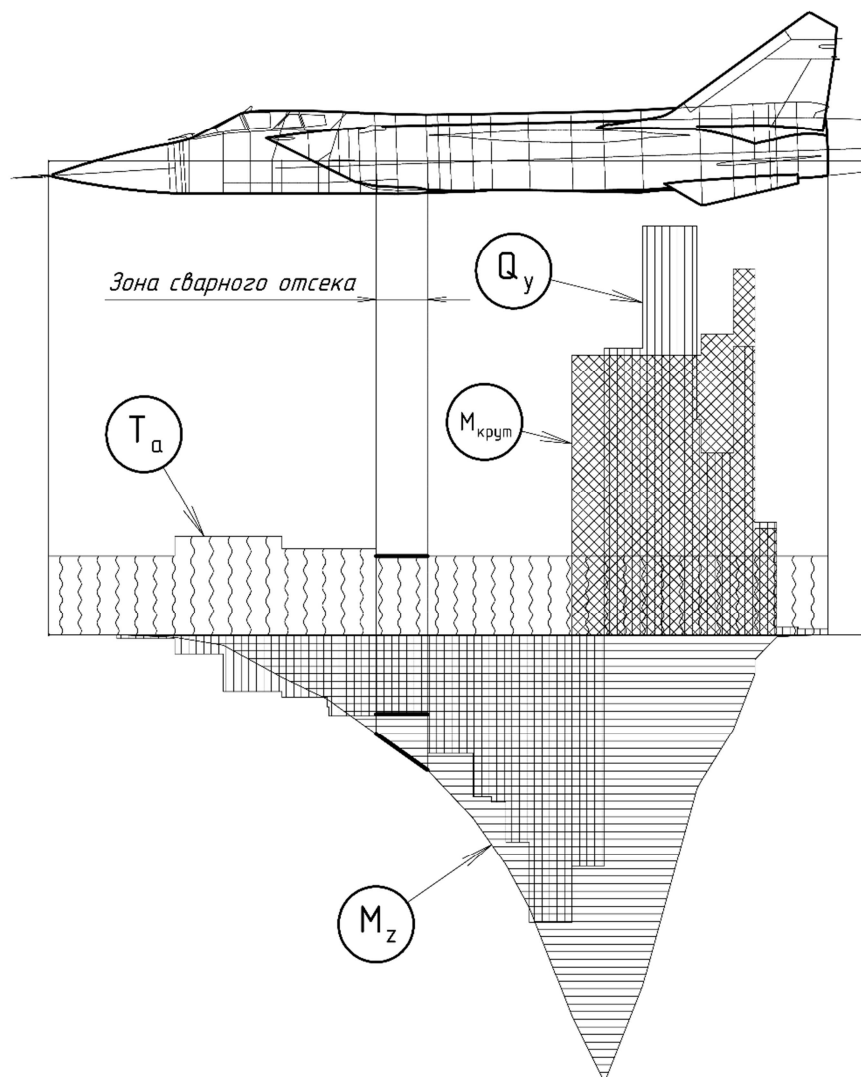


Рисунок 3.2 – Эпюры перерезывающей силы Q_y , изгибающего момента M_z , крутящего момента $M_{\text{крут}}$ и температуры T_a от аэродинамического нагрева. Тонкими линиями показана расчетная зона эпюр для сварного отсека

3.2 Алгоритм расчета

В соответствии с изложенным в подразделе 1.1 способом описания объекта исследования формализуем конструкцию сварного отсека в следующем порядке (принятая нумерация формализованных элементов каркаса для базового варианта сварного отсека приведена в Приложении А):

1. Создаем длинномерные элементы каркаса конструкции и задаемся профилем их сечения (Рисунок 3.3, Приложение А).

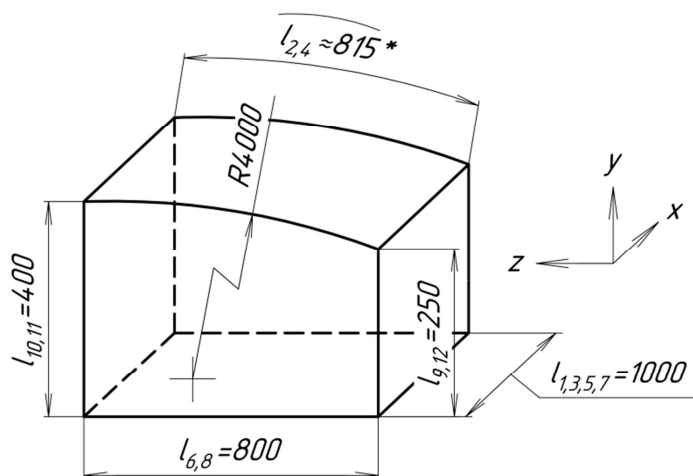


Рисунок 3.3 – Схема расположения и обозначения элементов каркаса сварного отсека

2. Создаем панелированные элементы конструкции и задаемся их толщиной (Рисунок 3.4). Принимаем в первом приближении $\delta_j = \{1;1;1;1;1;1\}$ мм.

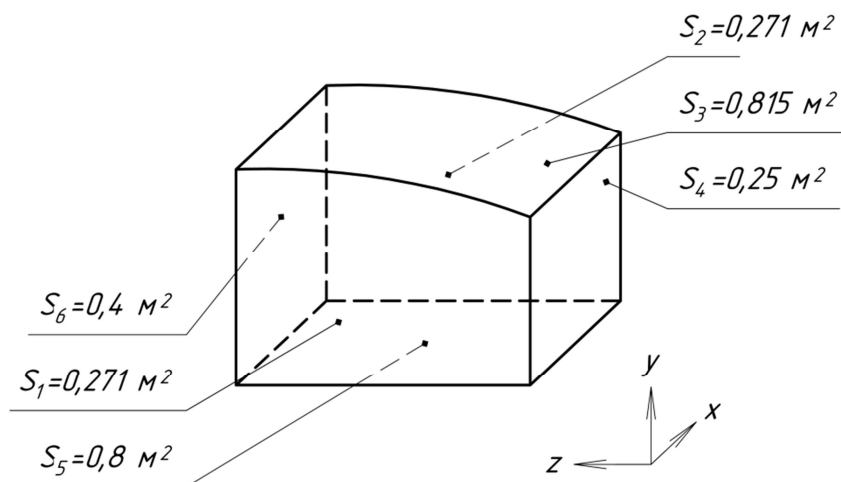


Рисунок 3.4 – Схема расположения и обозначения панелированных элементов сварного отсека

3. Выделяем ЗТВ сварных швов на панелированных элементах (Рисунок 2.4). Принимаем $b_k = 30$ мм в первом приближении.
4. Полученную геометрическую альтернативу сварного отсека дискретизируем в ПО с использованием МКЭ (Рисунок 2.3), в том числе:
 - 4.1. Присваиваем моделям материалов их температурозависимые характеристики (Рисунок 3.5).

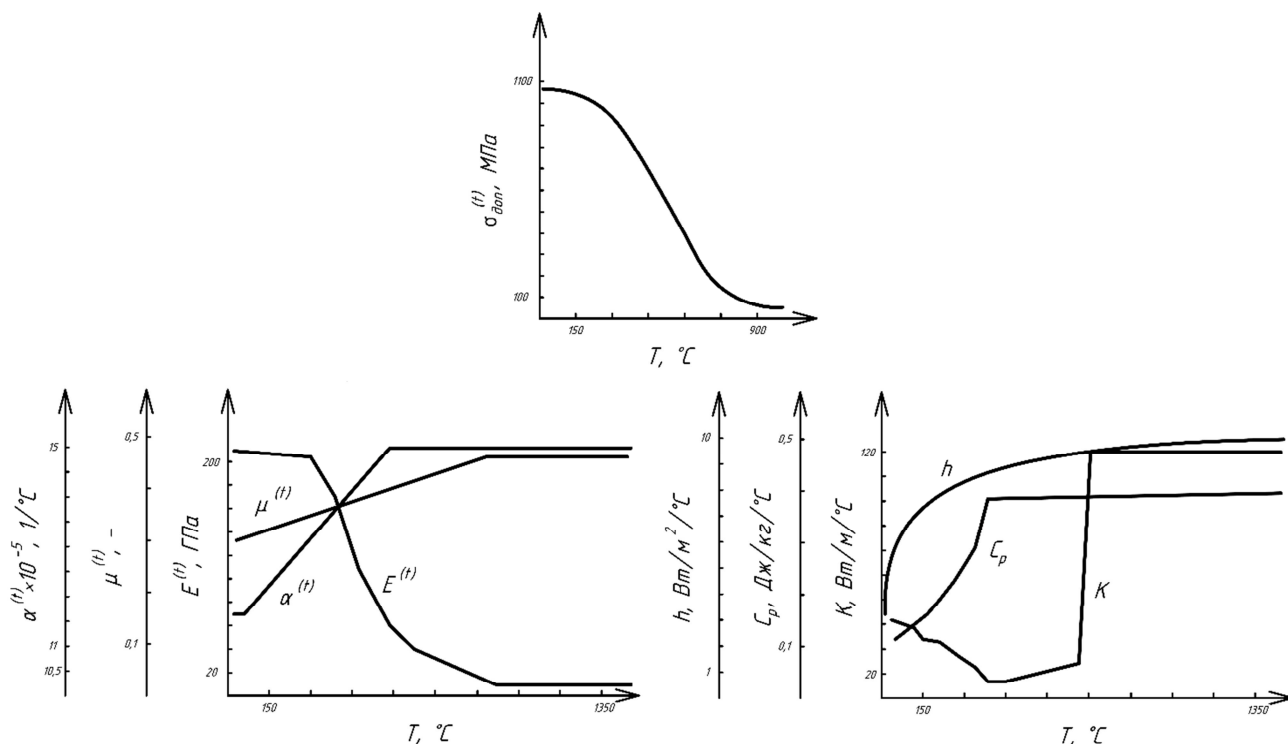


Рисунок 3.5 – К моделям материала

- 4.2. Присваиваем элементам каркаса балочные конечные элементы (B31) с заданными сечениями профилей – тавр, уголок и т.п. (п.1, Приложение А).
- 4.3. Присваиваем панелированным элементам оболочечные конечные элементы (S4R) с заданной приведенной толщиной панели.
- 4.4. Создаем структурированную конечно-элементную сетку.
- 4.5. Назначаем граничные условия. В данном примере: четыре шарнирных опоры в углах нижней панели сварного отсека (см. Рисунок 3.8).
- 4.6. Меняем плотность сеток КЭМ для одной КТС в целях верификации результатов расчета (Глава 4).

5. Назначаем остаточные напряжения в соответствии с директивным технологическим процессом (ДТП) сборки-сварки. В первом приближении для описанного сварного отсека величина остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ регулировалась усадкой ЗТВ в диапазоне температур $\Delta T = 150 \dots 0$ °С.
6. Повторяем пп. 1-6 для альтернатив сварного отсека имеющих качественные отличия в КТС: другие КСС, другой тип сварки, другой порядок сборки-сварки и т.п. Для наглядности удобно расположить их в форме набора таблицы, как показано в Приложении Б. Порядок именования и рассматриваемые альтернативы модельного сварного отсека показаны в Приложении Б.

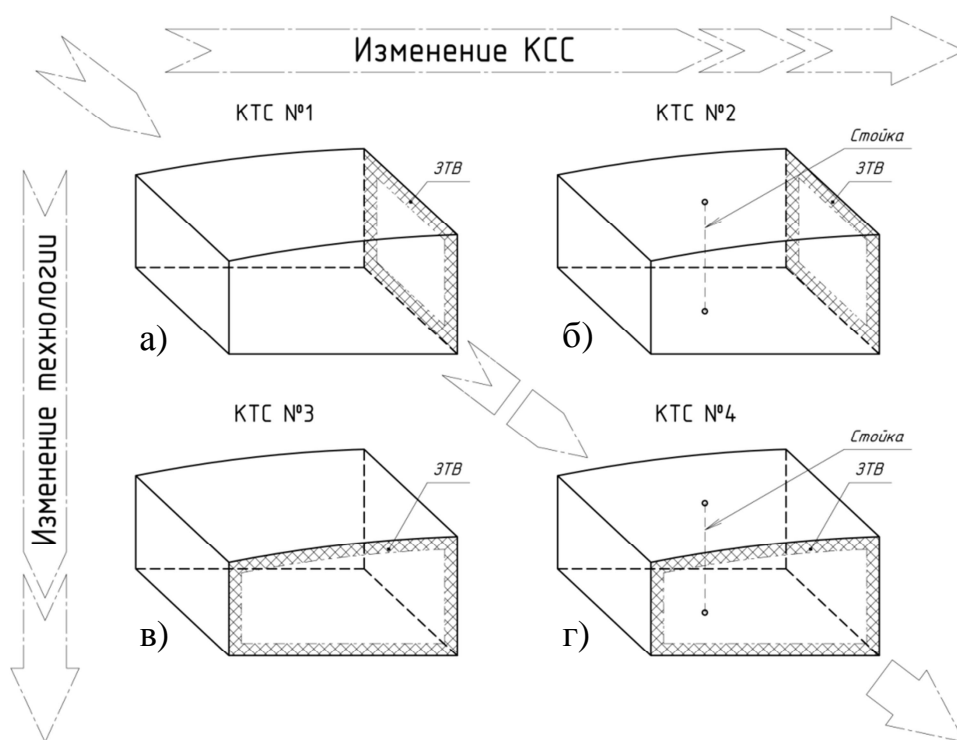


Рисунок 3.6 – Пример набора из 4-х альтернатив КТС сварного отсека

Обратим внимание, что КТС №1 и №2 (Рисунки 3.6 а, б) имеют отличия по КСС (наличие/отсутствие стойки), а КТС №2 и №4 отличаются по технологии (положение монтажного шва). Очевидно, что на диагоналях находятся схемы сварных отсеков КТС №1 и №4 наиболее удаленные по указанным конструктивно-технологическим признакам (Рисунки 3.6 а, г). Наглядно составить такую таблицу в начале исследования (оптимизации), чтобы в процессе отражать векторами направление рационализации КТС выбранного

сварного отсека: «изменение КСС», «изменение ДТП», «изменение КТС» в сторону от базового варианта (Приложение Б). Количество строк и столбцов ограничиваются опытом конструктора, а также логикой. Следует отметить, что такой подход к организации проектирования сварного отсека сверхзвукового самолета с учетом КТС нигде ранее представлен не был. Данное структурирование конструктивно-технологических признаков позволило сформировать пространство дискретных переменных исследования сварного отсека. Ясно, что по третьей оси (нормально к плоскости «изменение технологии – изменение КСС») откладываются значения критерия оптимальности. Все вместе формирует трехмерное дискретное критериальное пространство (Рисунок 3.7).

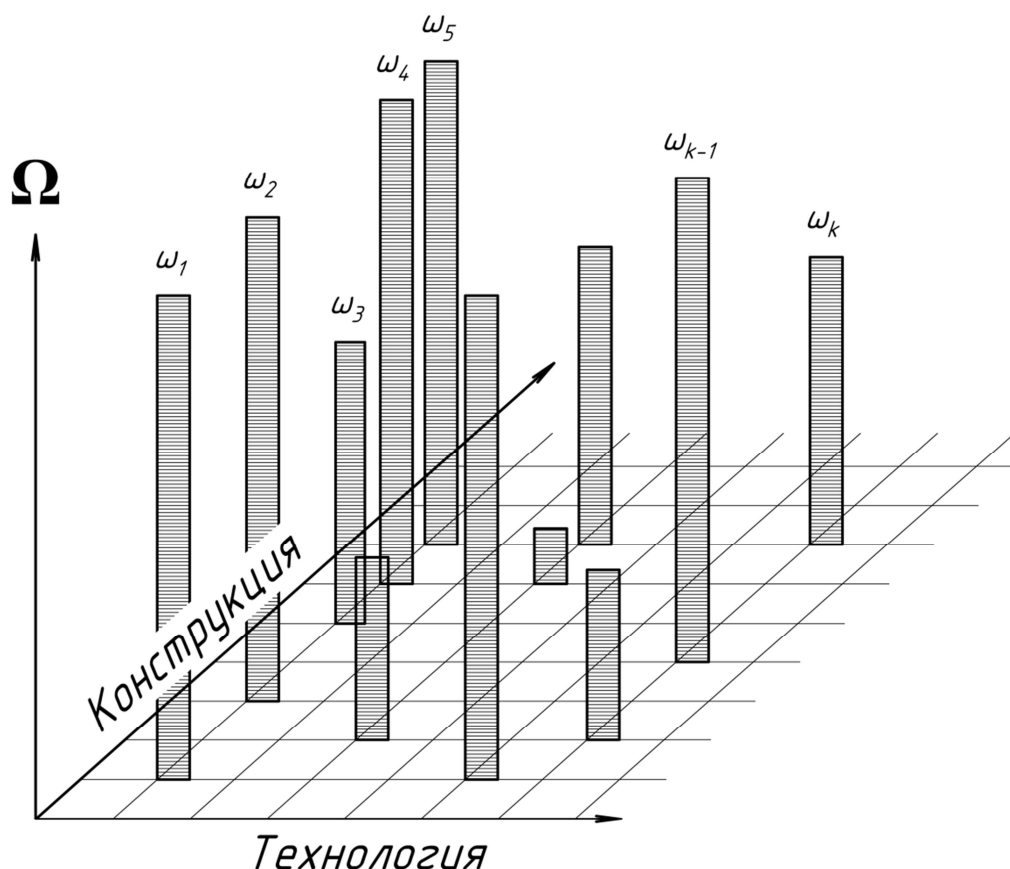


Рисунок 3.7 – Критериальное пространство

7. Прикладываем эксплуатационные/расчетные усилия и оцениваем НДС по выбранному критерию (Рисунок 3.8). В качестве примера рассматривалась верхняя панель сварного отсека, нагруженная поочередно растяжением и

сжатием от общего изгиба фюзеляжа в условиях аэродинамического нагрева. В случае растяжения расчет конструкции панели тривиален, т.к. действующие напряжения $\sigma_{действ}$ в верхней панели не зависят от совокупности конструктивно-технологических факторов, а зависят только от физико-механических свойств материала (Рисунок 3.5) и приведенной толщины панели. Но в случае сжатия данной панели решающее значение критического НДС находится в значительной зависимости от толщины, вида КТС и т.п. При определении НДС растянутой верхней панели сварного отсека расчет выполнялся по методу Ньютона-Рафсона, а при определении критического НДС сжатой панели сварного отсека использовался модифицированный метод Рикса [74]. В данной работе за критическое значение было принято НДС модели сварного отсека, удовлетворяющее условиям работоспособности верхней панели без потери устойчивости.

8. Оцениваем получившийся результат и при необходимости проводим параметрическую оптимизацию внутри одной КТС.
9. Если результат в п. 8 неудовлетворителен и $M_{омс} \geq M_0$, то возвращаемся в п.1, чтобы создать новый набор КТС сварного отсека, имеющий качественные отличия от исходного (Рисунок 3.6, Приложение Б).

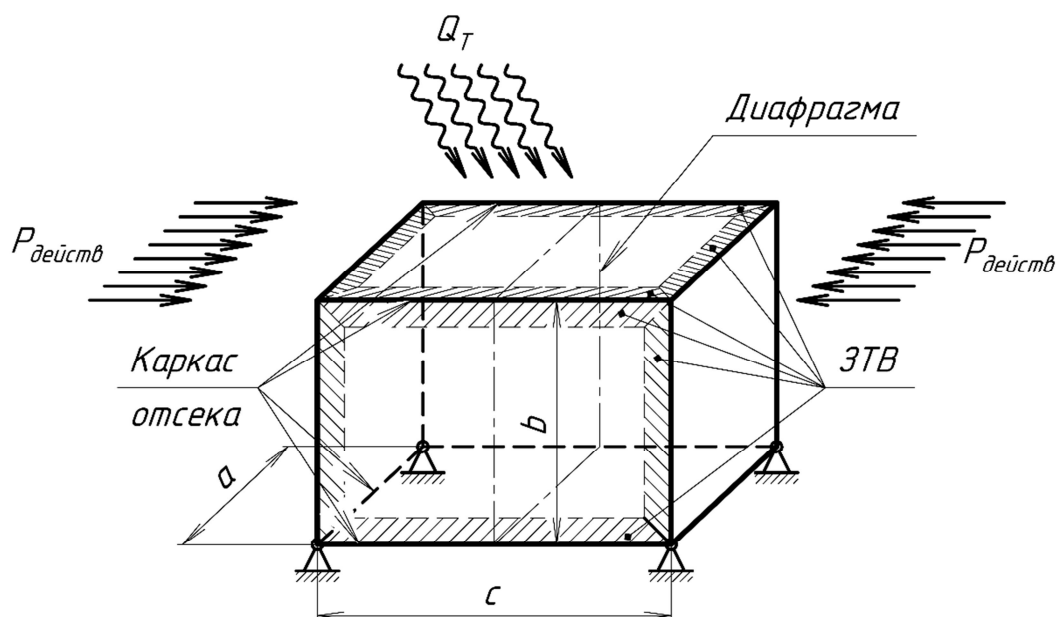


Рисунок 3.8 – Расчетная схема обобщенного сварного отсека и нагружения его верхней панели

3.3 Результаты расчета

Влияние остаточных напряжений и оптимизации технологии

На Рисунке 3.9 показаны качественные и количественные различия в НДС от действия остаточных напряжений S (МПа) и вертикальных прогибов U_2 (мм) на верхней панели сварного отсека сверхзвукового самолета для КТС №№1,6. Данные альтернативы имеют только качественные отличия и только в технологических переменных (Приложение Б).

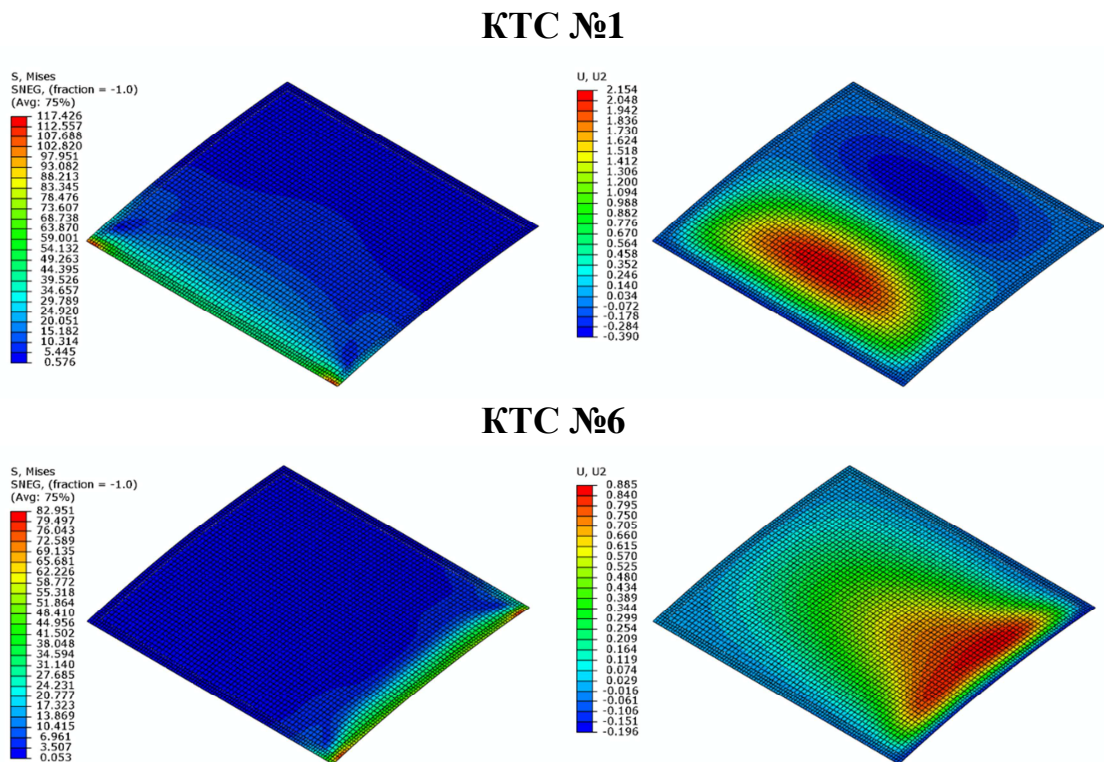
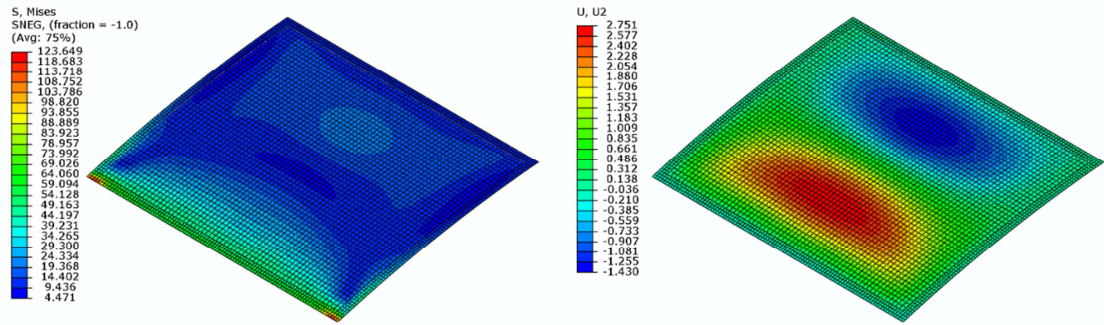


Рисунок 3.9 – Влияние технологических переменных КТС на предэксплуатационное НДС верхней панели сварного отсека

На Рисунке 3.10 показаны качественные и количественные различия в распределении действующих напряжений и вертикальных прогибов для КТС №№1,6 при НДС близких к критическим.

КТС №1



КТС №6

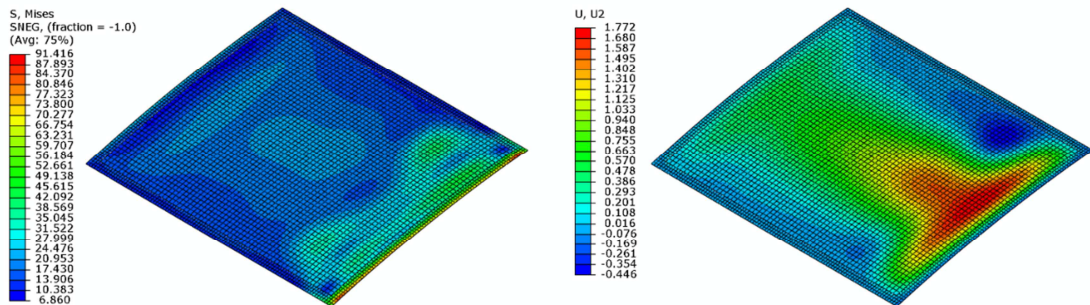


Рисунок 3.10 – Критическое НДС верхней панели сварного отсека

Из Рисунков 3.9, 3.10 видно, что для неподкрепленных панелей налицо незначительные различия в распределении и значениях критических напряжений и прогибов, и НДС при нулевом значении эксплуатационной нагрузки.

На Рисунке 3.11 показаны зависимости действующей силы в сварном отсеке (КТС №1) на сжатую верхнюю панель при разных значениях остаточных напряжений.

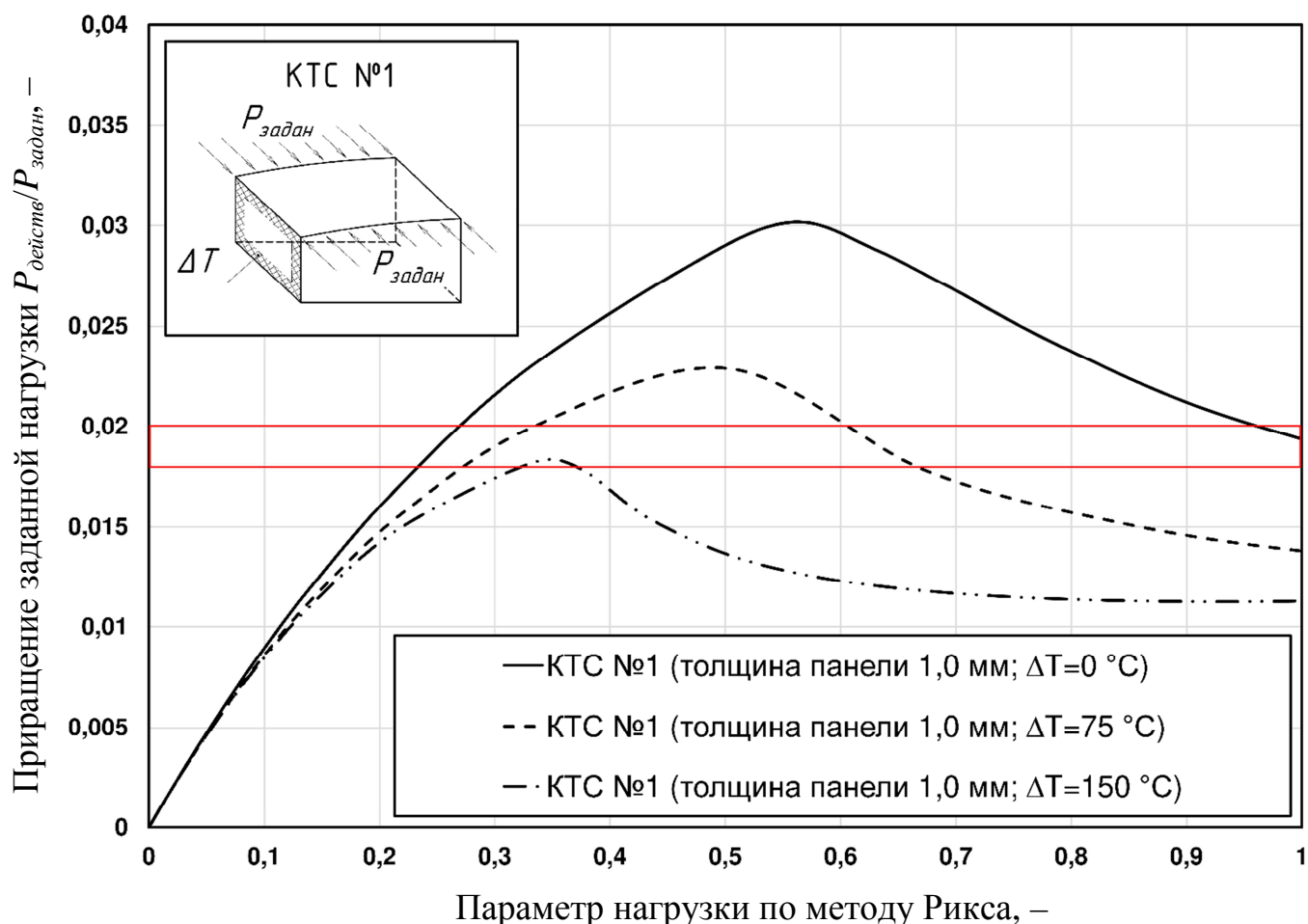


Рисунок 3.11 – Влияние остаточных сварных напряжений на изменение критического состояния НДС сварного отсека с приведенной толщиной верхней панели $\delta_3 = 1$ мм

Изменение знака производной каждой кривой означает изменение несущей способности силовой конструкции отсека, что в свою очередь сигнализирует о потере устойчивости верхней панели. Общей потери устойчивости всей конструкции отсека не происходит, поскольку действующие силы не обнуляются (и так как графики не уходит в отрицательные значения), сохраняя несущую способность силовой схемы. Значение нагрузки в точке экстремума на графиках есть $P_{\text{крит}}$. Из данных графиков следует, что учет преднапряженного состояния конструкции отсека (т.е. влияние величины остаточных напряжений) снижает на 40% несущую способность сжатой верхней панели ($P_{\text{крит}} = 1,8\% P_{\text{задан}}$). Обратим внимание, что в данной постановке задачи $\bar{M}_{\text{отс}} = 1$ ($M_{\text{отс}} = 28,47$ кг), при этом $\bar{M}_{\text{каркаса}} = 0,23$ и $\bar{M}_{\text{панелей}} = 0,77$, иными словами масса силовой части конструкции

осталась неизменной в этих условиях параметрической (частичной) оптимизации технологии сварки. Аналогичная картина будет наблюдаться и в КТС №6, а несущая способность по мере уменьшения влияния сварки будет стремиться к показателям КТС №1. Влияние остаточных напряжений на распределение напряжений и деформаций в верхней панели было показано выше.

Влияние параметрической оптимизации толщины верхней панели

Для решения оптимизационной задачи и снижения массы сварного отсека следует уменьшать толщины и сечения силового набора, а поскольку относительная масса панелей превалирует над относительной массой элементов каркаса, то наиболее эффективно оптимизировать массу верхней панели. Для этого необходимо ослабить влияние остаточных напряжений. Критерием достигнутого оптимума массы будет сохранение несущей способности сжатой панели на уровне $P_{крит} = 1,8...2,0\% P_{задан}$ (Рисунок 3.11). При этом масса КТС №1,6 и КТС №11 сварного отсека снижается до $M_{отс} = 27,19$ кг ($\bar{M}_{отс} \approx 0,955$), сравнительные результирующие графики показаны на Рисунке 3.12.

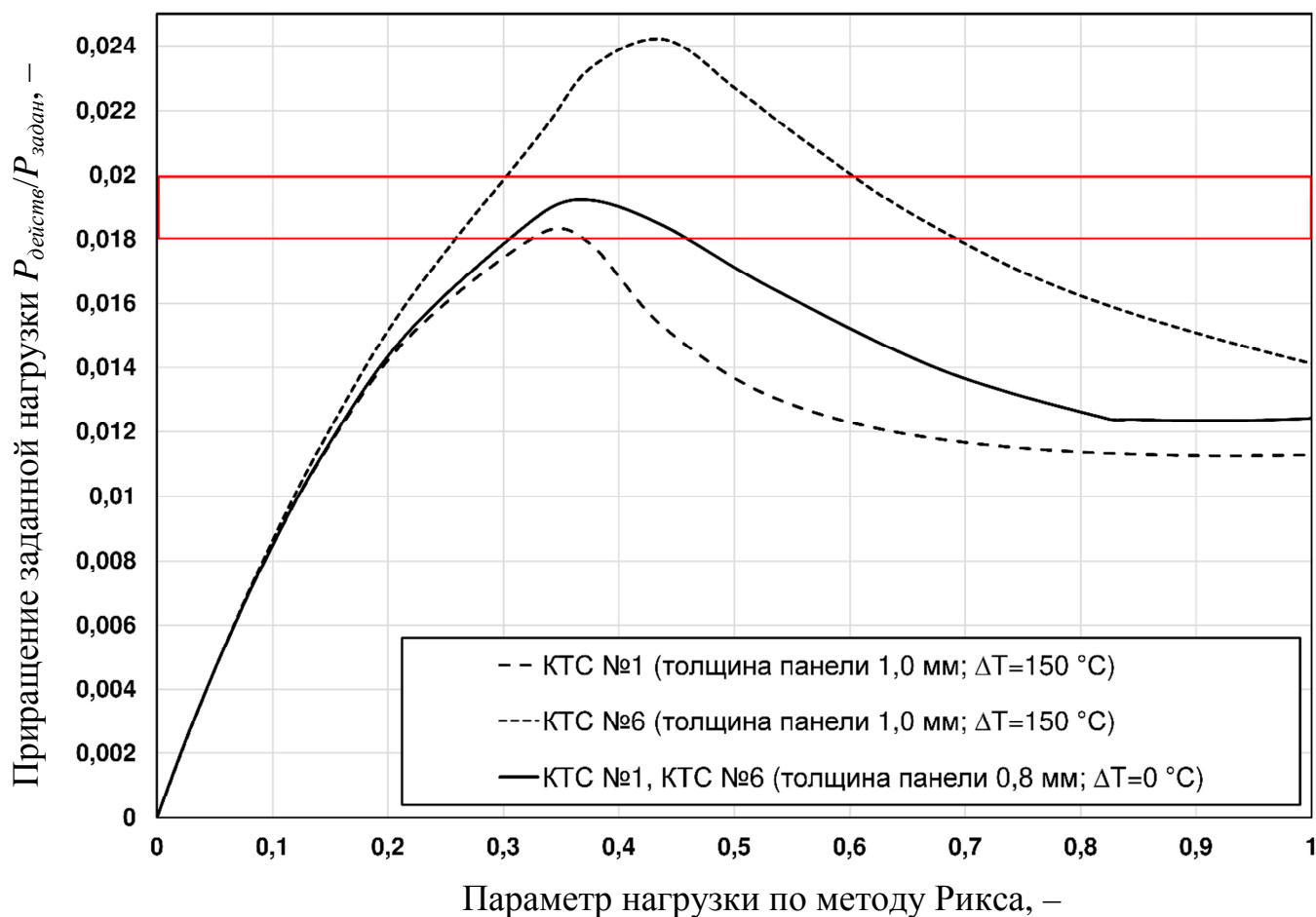


Рисунок 3.12 – Влияние параметрической оптимизации толщины верхней сжатой панели и технологии на изменение несущей способности отсека

Влияние структурно-параметрической оптимизации

Рассмотрим совместное влияние количественных и качественных конструктивно-технологических переменных в схемах сварных отсеков на их массу. Качественной переменной в первом приближении является диафрагма, подкрепляющая верхнюю панель. Результаты структурно-параметрической оптимизации сварного отсека с подкрепляющими элементами в виде диафрагм показаны на Рисунках 3.13-3.14.

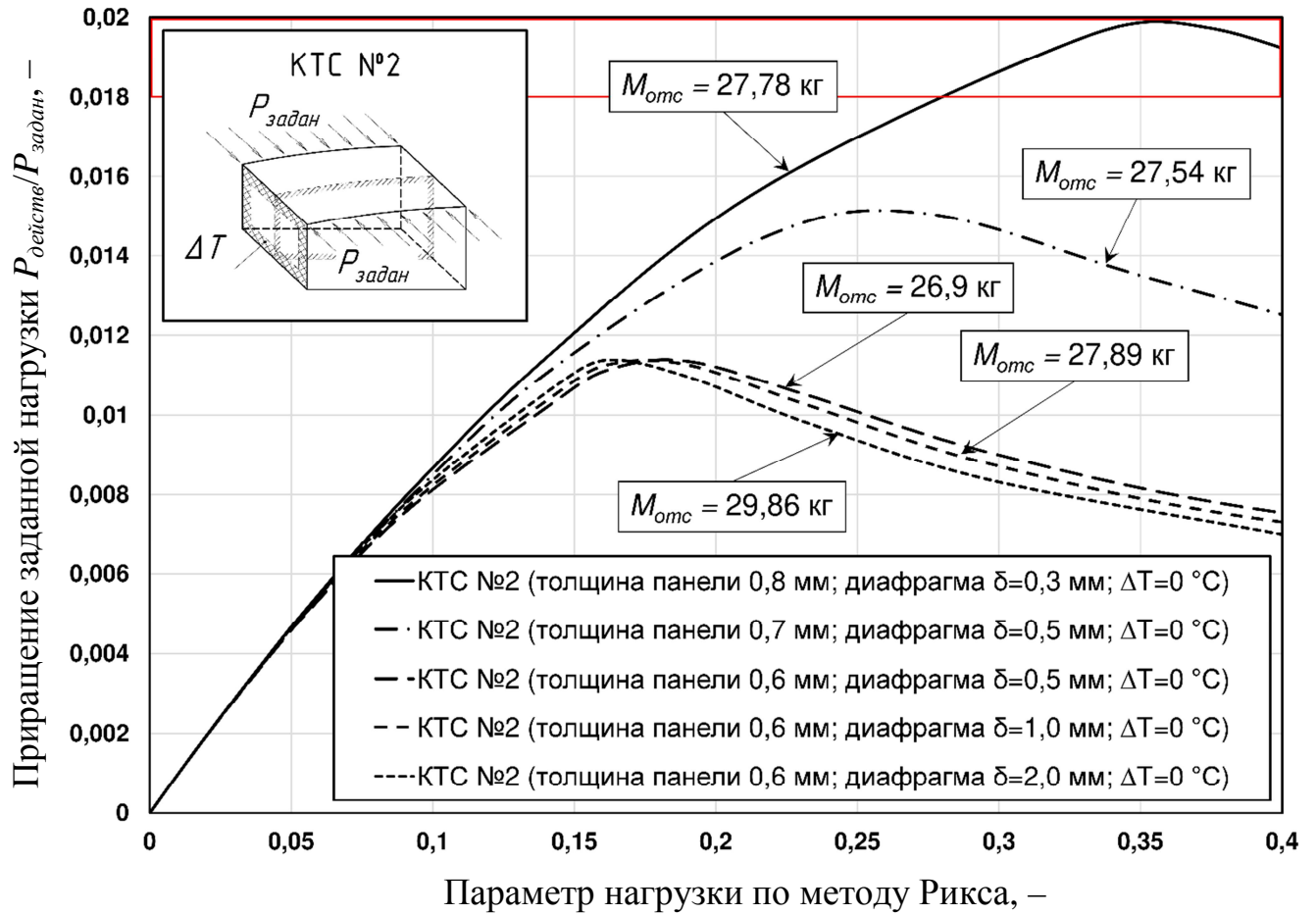


Рисунок 3.13 – Влияние структурно-параметрической оптимизации КТС №2 сварного отсека на изменение его несущей способности и массу конструкции отсека

Из Рисунка 3.13 видно, что переход от КТС №№1,6 (Рисунок 3.12) к КТС №№2,7 с подкреплением верхней панели в форме диафрагмы приводит к увеличению базовой массы отсека за счет дополнительного силового элемента. Отмечается, что изменение толщины диафрагмы при снижении массы верхней панели (уменьшении ее толщины) никоим образом не увеличивает и не сохраняет несущую способность. Существенное влияние на несущую способность верхней панели сварного отсека, как и ранее, оказывает ее толщина, что и показал верхний график на Рисунке 3.12. При размещении двух диафрагм в КТС №№3,8 имеют место и другие решения (Рисунок 3.14). Они реализуются за счет большего утонения толщины верхней панели при установке двух тонких подкрепляющих диафрагм.

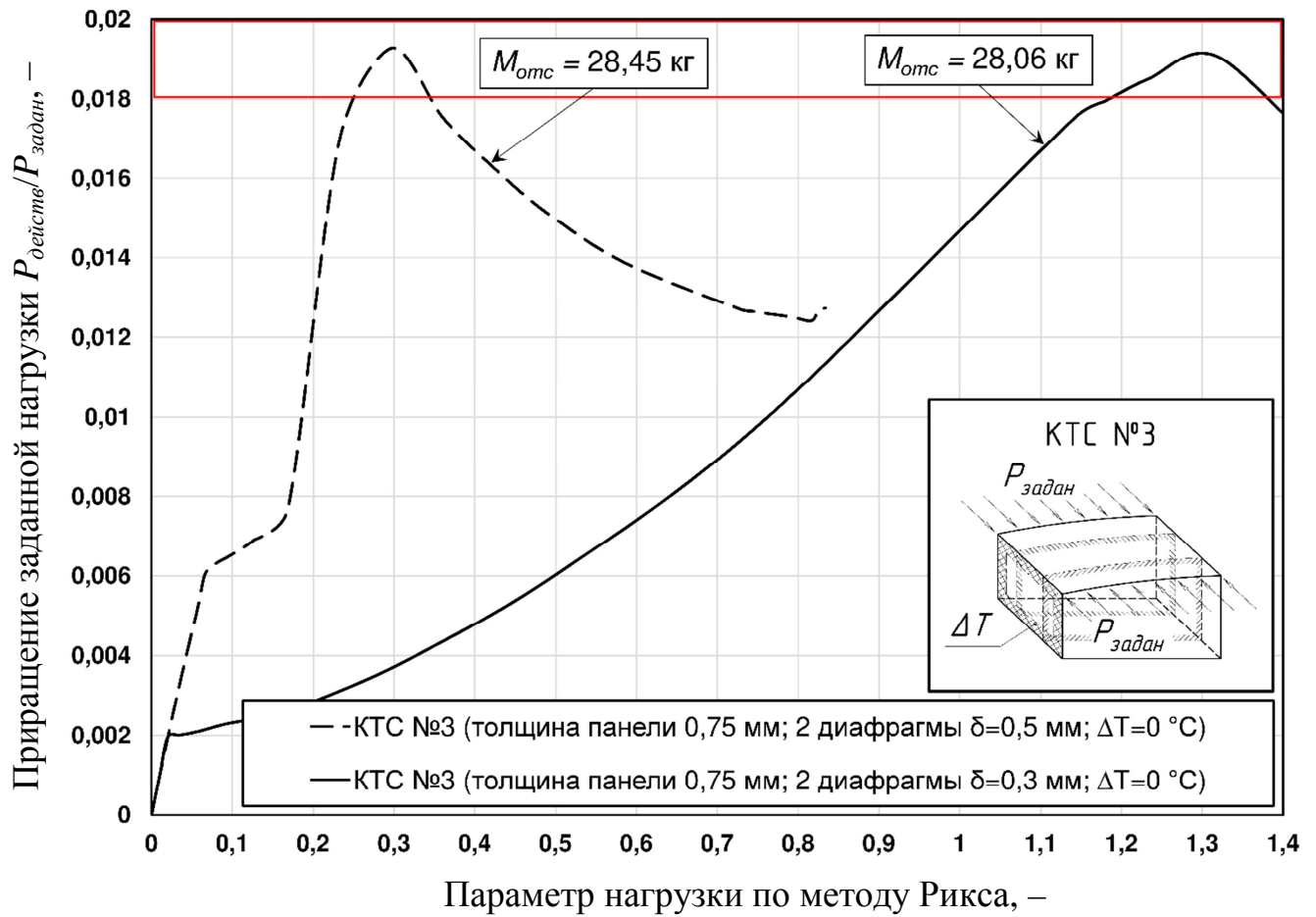


Рисунок 3.14 – Влияние структурно-параметрической оптимизации сварного отсека по КТС №3 на изменение его массы

На Рисунке 3.15 показаны качественные и количественные отличия в распределении действующих напряжений и вертикальных прогибов для разных КТС сварного отсека, а также показано достигнутое уменьшение массы отсека. Заметим, что достигнутые величины действующих напряжений $\sigma_{действ} = \sigma_{крит}$ еще далеки до временного сопротивления σ_s для сплавов свариваемой современной стали.

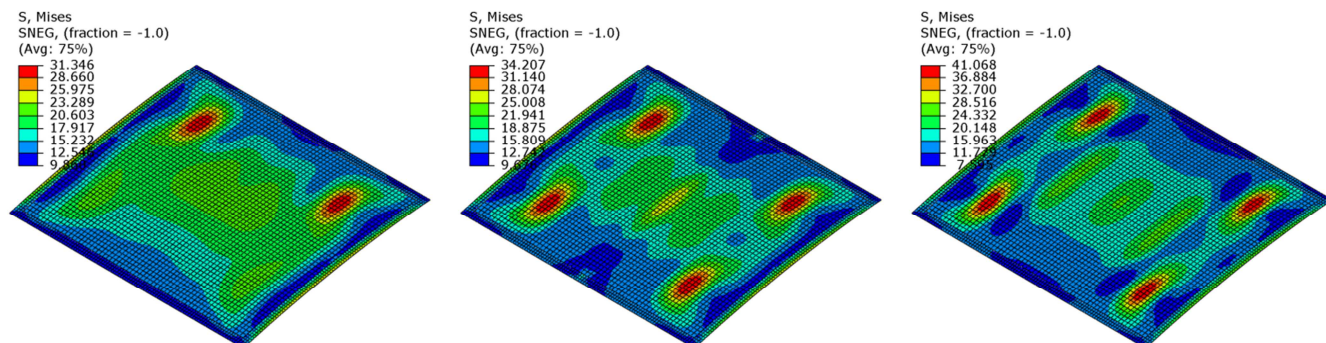
Важно понимать, что представленное структурно-параметрическое исследование базировалось на оптимизации массы относительно базового сварного отсека (КТС №1). При выборе КТС №3 в качестве исходной, можно достигнуть большего относительного снижения массы, так как подкрепляющие элементы силового набора (диафрагмы) будут входить в массу базового сварного отсека.

КТС №№1,6

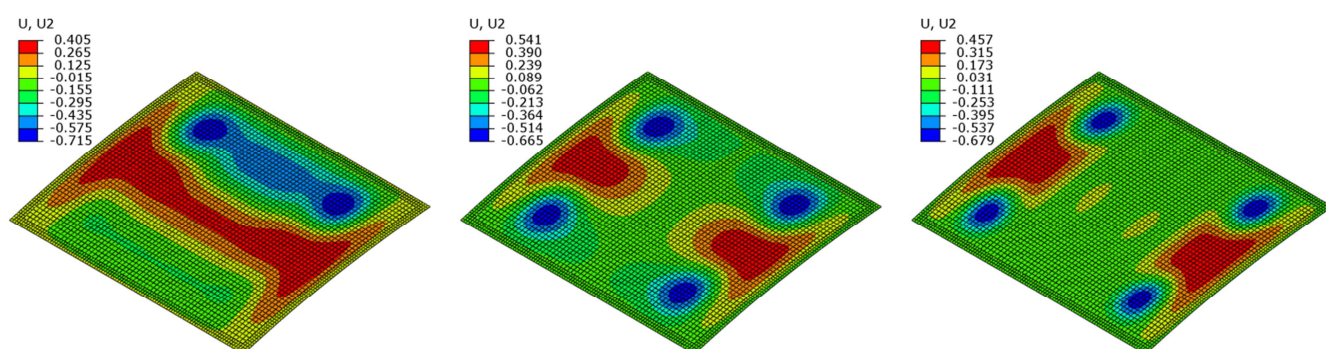
КТС №№2,7,12 (с диафрагмой)

КТС №№3,8,13 (с 2-мя диафрагмами)

Распределение действующих напряжений S, МПа:



Распределение вертикальных прогибов U2, мм:



$$M_{omc} = 27,19 \text{ кг}$$

$$\bar{M}_{omc} = 0,955$$

$$M_{omc} = 27,78 \text{ кг}$$

$$\bar{M}_{omc} = 0,975$$

$$M_{omc} = 28,06 \text{ кг}$$

$$\bar{M}_{omc} = 0,985$$

Рисунок 3.15 – НДС верхней панели отсека в момент потери устойчивости.

Внизу под картинками показаны достигнутые значения масс конструкции отсека при параметрической оптимизации внутри каждой КТС

Из Рисунка 3.15 видно, что зона максимального выпучивания верхней панели по мере введения дополнительных подкреплений смещается в сторону нерегулярных частей конструкции. Следует также обратить внимание на то, что значения критического НДС незначительно отличаются. Кроме этого введение подкрепляющих элементов в виде сплошных диафрагм не приводит к значимой локализации напряжений в месте их крепления к верхней панели.

Перейдем к исследованию других КТС с участием стоек, имитирующих иной вариант подкрепления верхней панели. Примером конструкции такого подкрепления могут служить стойки (Рисунок 1.10). На этом рисунке также показан

пример промежуточного (несилового) шпангоута и штампованной из листа стойки, которые соединяются между собой ТЭС с помощью сварочных клещей.

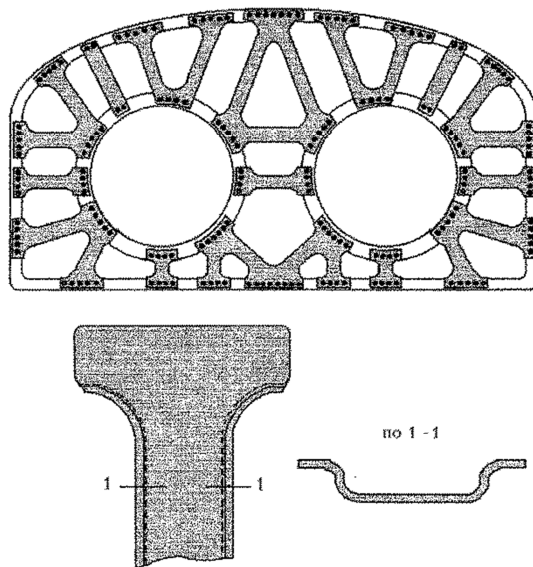


Рисунок 3.16 – Схема промежуточного шпангоута

Для КТС со стойками КЭМ оформлялась аналогично каркасным элементам основного силового набора сварного отсека (см. подраздел 3.1). Оси стоек перпендикулярны поверхности верхней панели. Для моделирования балочного сечения использовался профиль шириной 50 мм и варьируемой толщиной листа в диапазоне 1...2 мм.

Результирующие графики представлены на Рисунках 3.17-3.18. Из графиков видно, что влияние технологии в заданном диапазоне меняется кардинально по сравнению с КТС, подкрепленными диафрагмами. Появился локальный оптимум, что говорит о местной потере устойчивости на верхней панели. Такие явления показывают, что следует более тщательно проводить исследование в дальнейшем, поскольку частичная оптимизация по технологии сборки-сварки, дает больше резервов для уменьшения массы конструкции.

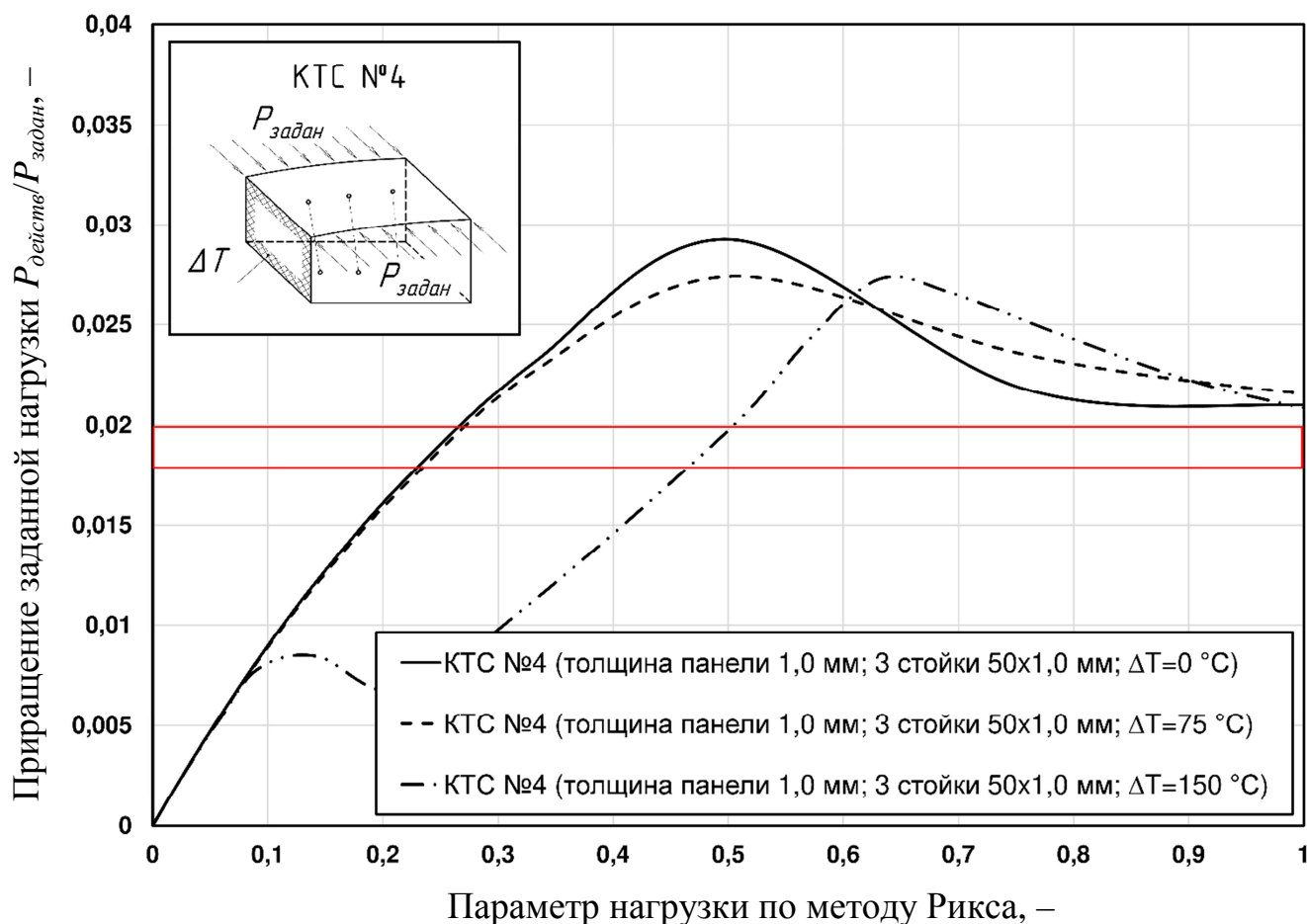


Рисунок 3.17 – Влияние технологии в КТС №4 (со стойками)

Другой важной особенностью данной схемы является то, что в отличие от КТС №№2,3 на несущую способность верхней панели оказывает заметное влияние параметрическая оптимизация подкрепляющих элементов (Рисунок 3.18). Увеличение толщины стойки отвечает заметным увеличением несущей способности, таким образом, что позволяет сохранить 50% заложенных остаточных напряжений в качестве резерва для последующей оптимизации технологии.

Данное обстоятельство подчеркивает важность скрупулезного структурно-параметрического исследования всех КТС с целью выявления нужного сочетания качественных и количественных переменных, обеспечивающих рациональность будущей конструкции сварного отсека.

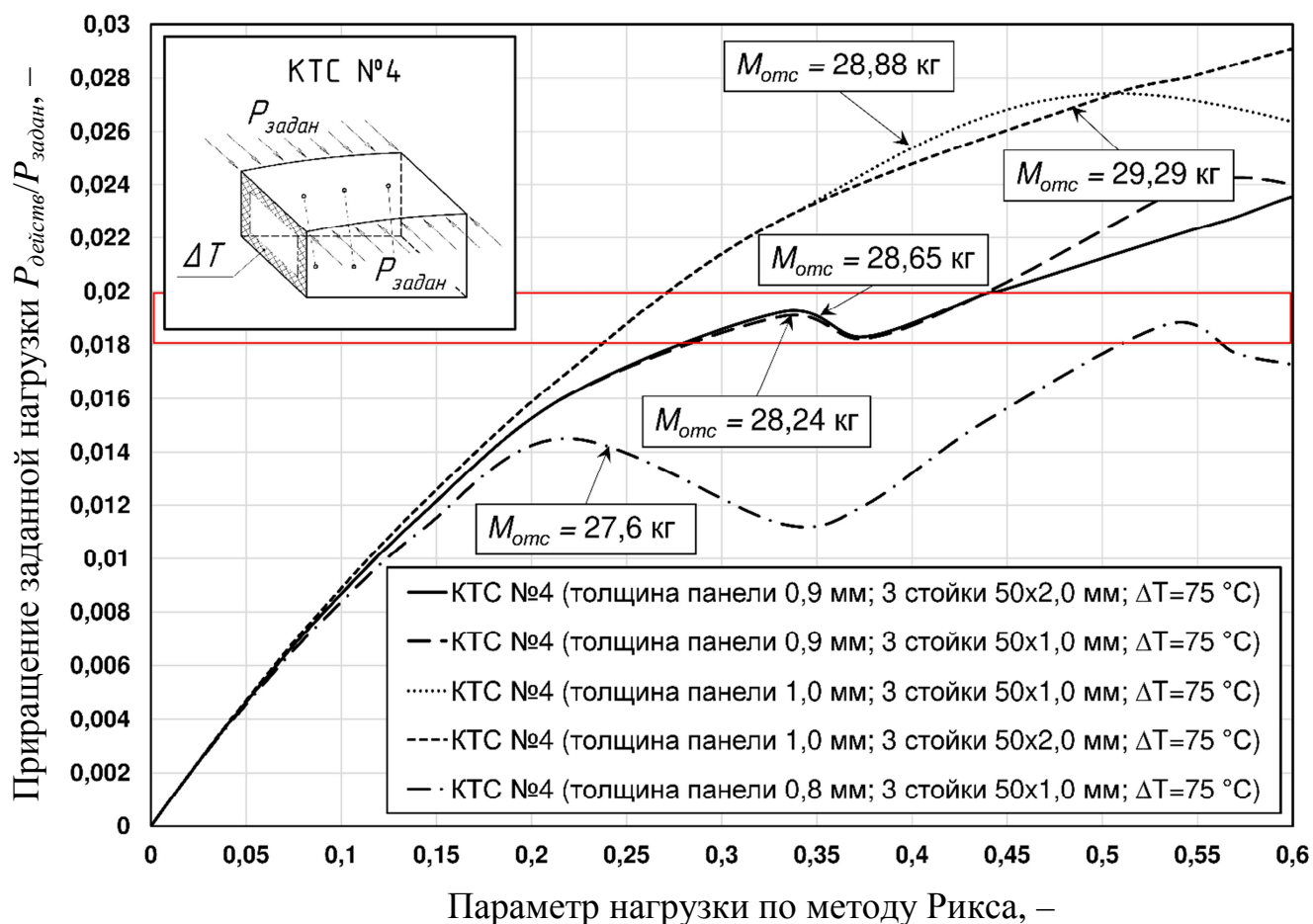


Рисунок 3.18 – Влияние структурно-параметрической оптимизации КТС №4 сварного отсека на изменение его несущей способности и массу конструкции отсека

На Рисунке 3.19 показано влияние технологии для КТС №5. Здесь мы видим, что отсутствуют особенности, наблюдавшиеся в КТС №4, и поведение схоже с КТС №1. Разница заключается в том, что между несущей способностью $\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\Delta T = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ нет такого существенного отличия как в КТС №1. Также следует отметить, что увеличение несущей способности за счет введения шести подкрепляющих стоек при $\Delta T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ не достигается необходимый эффект увеличения несущей способности верхней панели, а происходит лишь увеличение массы конструкции сварного отсека.

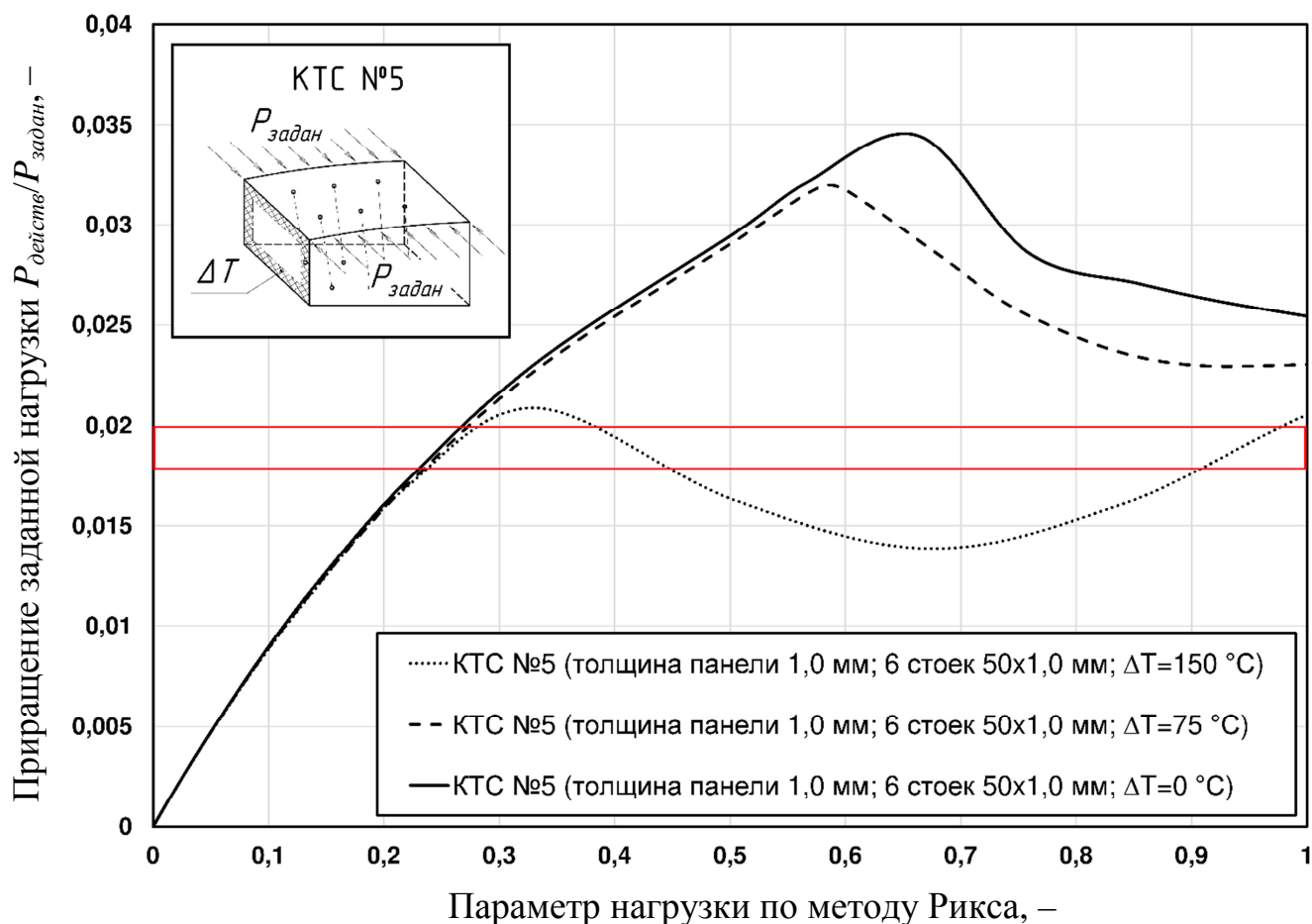


Рисунок 3.19 – Влияние технологии в КТС №5 (с 6-ю стойками)

На Рисунке 3.20 показано влияние на достижимые значения масс сварного отсека по КТС №5 при структурно-параметрической оптимизации. На данном рисунке хорошо видно влияния частичной и полной оптимизаций по технологии сварки (уменьшение значения ΔT), при одновременно осуществленной оптимизации толщины верхней панели. Можно заметить, что, как и в случае КТС №2 (см. Рисунок 3.13) изменение толщины подкрепляющего элемента, в данном случае – стойки, не оказывает влияния на несущую способность верхней панели. Однако, влияние на массу всего сварного тоже невелико в случае дискретного подкрепления, что и показывают две нижние кривые.

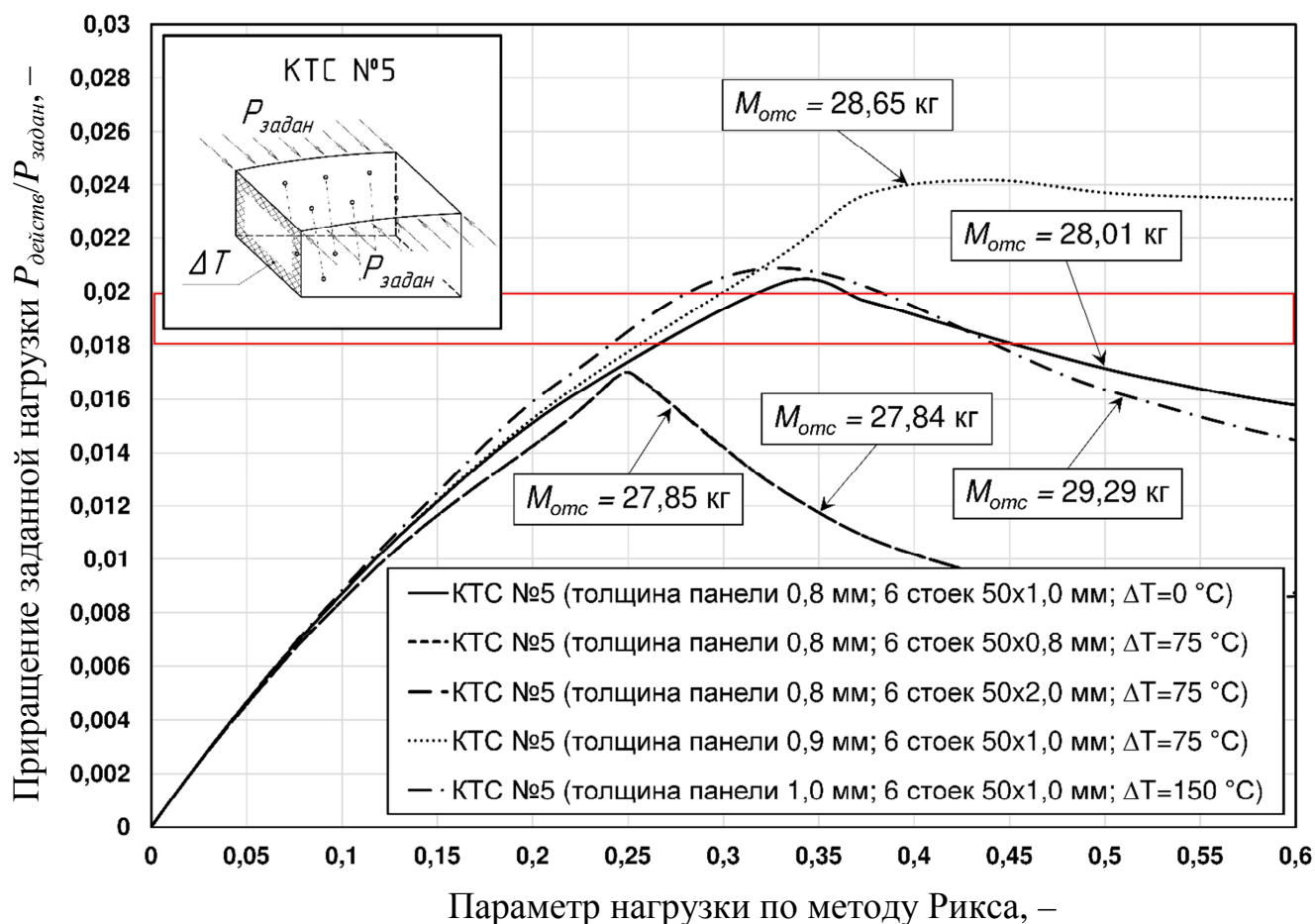


Рисунок 3.20 – Влияние структурно-параметрической оптимизации КТС №5 сварного отсека на изменение его несущей способности и массу конструкции отсека

Зависимость прогибов от КТС

Как было показано в подразделе 2.1 иногда полезно устанавливать в качестве функционального ограничения прогибы. Таким образом, наложение данного ограничения на внешние панели предупреждает изменение заданных нагрузок, как в задачах механики с обратной связью. Численная модель и расчет по методу Рикса позволяют контролировать прогибы в определенных точках. Результаты анализа в виде зависимостей прогибов в точке регулярной части конструкции верхней панели от параметра нагрузки для пары альтернатив (КТС №№6,9) представлено на Рисунке 3.21.

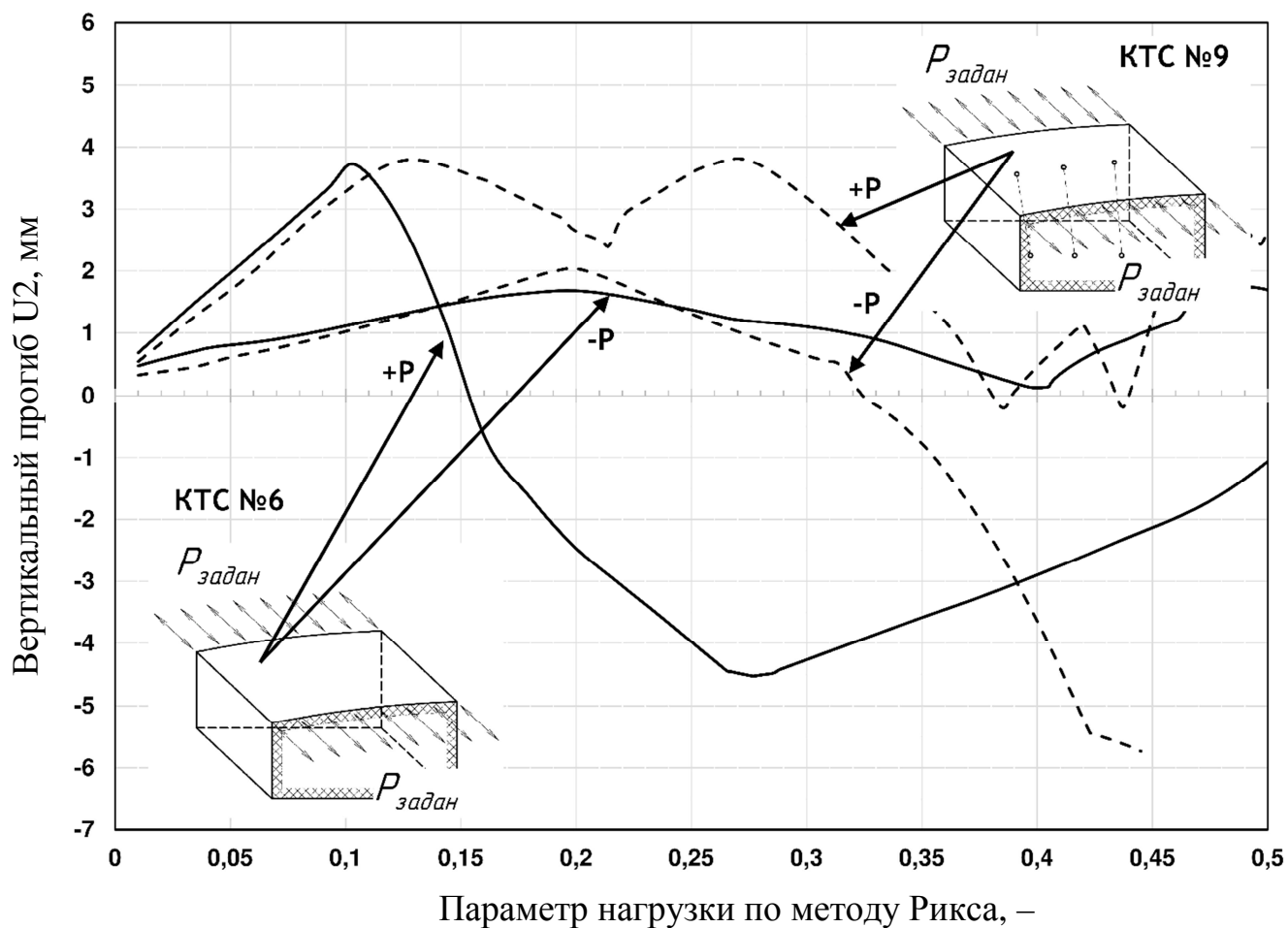


Рисунок 3.21 – Зависимости прогибов в регулярной части верхней сжато-растянутой панели:
 «+P» – сжимающая нагрузка;
 «-P» – растягивающая нагрузка

Как видно из Рисунка 3.21, для двух КТС, имеющих различия в КСС, отмечается схожесть поведению до определенного значения нагрузки. Данный вывод верен как для сжатой панели, так и при ее растяжении. Однако, в случае сжатия, данное обстоятельство справедливо лишь на незначительном участке. Также следует выделить, что до определенного значения нагрузки (которая может оказаться критической) для каждой КТС характерен определенный диапазон прогибов.

3.4 Анализ результатов расчетов

Проведенные в этой главе структурно-параметрические исследования разные конструктивно-технологических схем сварного отсека сверхзвукового само-

лета показали различные результаты оптимизации. Для начала сведем в таблицу данные о начальных значениях масс КТС (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Исходные абсолютные значения масс конструкций

	Масса начальной конструкции сварного отсека, кг				
	↔ изменение конструкции ↔				
↔ изменение технологии ↔	КТС №1	КТС №2	КТС №3	КТС №4	КТС №5
	28,47	30,45	32,42	28,88	29,29
	КТС №6	КТС №7	КТС №8	КТС №9	КТС №10
	28,47	30,45	32,42	28,88	29,29
	КТС №11	КТС №12	КТС №13	КТС №14	КТС №15
	28,47	30,45	32,42	28,88	29,29

Далее объединим в другой таблице достигнутые результаты оптимизации (Таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Достигнутые значения абсолютных и относительных масс

	Масса оптимизированной конструкции сварного отсека, кг				
	/				
	Масса, отнесенная к M_0 КТС №1, –				
	↔ изменение конструкции ↔				
↔ изменение технологии ↔	КТС №1	КТС №2	КТС №3	КТС №4	КТС №5
	27,19	27,78	28,06	28,24	28,01
	/	/	/	/	/
	0,955	0,976	0,986	0,992	0,984
	КТС №6	КТС №7	КТС №8	КТС №9	КТС №10
	27,19	27,78	28,06	28,24	28,01
	/	/	/	/	/
	0,955	0,976	0,986	0,992	0,984
	КТС №11	КТС №12	КТС №13	КТС №14	КТС №15
	27,19	27,78	28,06	28,24	28,01
	/	/	/	/	/
	0,955	0,976	0,986	0,992	0,984

Как указывалось, многокритериальная оптимизация затруднена, так как между критериями существуют противоречия, которые можно устранить, переве-

для критерии в функциональные ограничения. К таким критериям относится вышеупомянутый критерий «собираемости» сварного отсека. Его можно проиллюстрировать (Рисунок 3.22). Из этого рисунка видно, что установка и крепление промежуточных подкрепляющих диафрагм с помощью сварных клещей, а также стоек, является предпоследним этапом сборки-сборки. Заключительным шагом является установка боковой панели в сварной отсек (для расчетной модели $j = 4$).

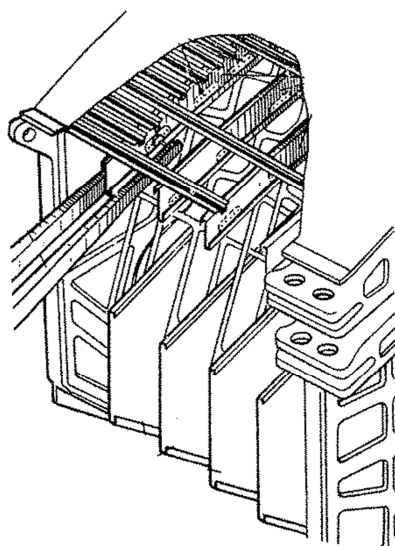


Рисунок 3.22 – К критерию «собираемости» сварного отсека

Согласно описанию критерия «собираемости» (см. подраздел 2.1), для компенсационного сварного отсека (Рисунок 1.10) с учетом дополнительного функционального ограничения Таблица 3.2 преобразуется (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Влияние функционального ограничения

		Масса, отнесенная к M_0 КТС №1, –				
		↔ изменение конструкции ↔				
↔ изменение технологии ↔	КТС №1	КТС №2	КТС №3	КТС №4	КТС №5	
		0,955	0,976	0,986	0,992	0,984
	КТС №6	КТС №7	КТС №8	КТС №9	КТС №10	
		0,955	0,976	0,986	0,992	0,984
КТС №11	КТС №12	КТС №13	КТС №14	КТС №15		
	0,955	0,976	0,986	0,992	0,984	

С учетом нового функционального ограничения возможно рассмотрение только первой строки таблицы альтернатив сварного отсека (КТС №№1-5). Если развить идею о критериях, перешедших в функциональные ограничения, то следует упомянуть критерий «предназначения» сварного отсека (подраздел 1.2). Так, при назначении его приборным, очевидно, что внутри сварного не могут присутствовать элементы, ограничивающие установку приборного оборудования. Следуя этим рассуждением функциональное ограничение оставит для выбора проектировщику только первый столбец. Если необходимо учитывать оба описанных критерия, то пересечение ограничений оставит КТС №1 в рамках представленной выборки альтернатив КТС. Таким образом, в случае проектирования топливного компенсационного отсека (Рисунок 1.10) можно рекомендовать КТС из двух последних столбцов.

По результатам расчетов третьей главы сделаны следующие выводы:

1. Разработанная модель сварного отсека сверхзвукового самолета позволяет оценить влияние конструктивных и технологических факторов на НДС отсека. С использованием модели можно решать задачи оптимизации с требованиями-ограничениями: по допустимым напряжениям, по величине прогибов, по формам потери устойчивости, по лимитной массе отсека и т.п. Решение таких многофакторных и многокритериальных задач оптимизации позволяет сократить сроки проектирования и объем экспериментально-исследовательских работ.
2. Учет остаточных напряжений уменьшает весовую эффективность панелей на 20% и качественно изменяет картину распределения напряжений (деформаций) по площади панелей, а также уровень «критического» НДС отсека.
3. Предложенная методика позволила определить рациональные конструктивные параметры панелей сварного отсека по критерию минимума массы для нескольких КТС и достигнутые значения величин снижения массы сварного отсека по отношению к базовой варьируется от 0,8% для КТС №4 до 4,5% при использовании КТС №№1,6,11.

4. Методика дает возможность устанавливать допустимые пределы остаточных напряжений для получения минимальной массы конструкции сварного отсека при заданных условиях комплексного нагружения и выбирать рациональные КТС.
5. Было показано, что диапазон достигаемого эффекта от оптимизации при использовании такой методики будет тем больше, чем больше альтернатив КТС будет проанализировано.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

При оценке достоверности расчетных данных следует руководствоваться следующим порядком: сначала проводить верификацию, а затем их валидацию. Для верификации расчетов по выбранному методу проводят проверку их выполнения. При осуществлении валидации проводят процедуру проверки достоверности результатов расчета.

4.1. Верификация расчетов МКЭ

Решение по МКЭ носит приближенный характер, поскольку имеет численную природу. Ошибки неизбежны и их степень зависит от сложности самой модели. Смысл верификации в том, чтобы предупредить влияние этих ошибок на саму конструкцию. Помимо прочих оценок существует ряд верификационных вопросов, на которые ниже приведены ответы:

1. *Как соотносятся основные размеры КЭМ и реального физического объекта?*

В подразделе 3.1 было показано соответствие размерности модели исследуемому объекту. В Главе 3, Приложении А указаны естественные, физичные размерности для элементов силового набора, учитывающие особенности сварных соединений в части допустимых для сварки между собой толщин.

2. *Как соотносятся свойства модели материала и реального материала?*

В подразделе 3.1 (Рисунок 3.5) были показаны диаграммы изменения физических механических свойств материала, которые были заимствованы из [48]. Данные свойства материала, а также их изменение хорошо согласуется с данными из [58], [61], [75]. Как было показано физическая нелинейность для статических расчетов при идеально-упругом материале отражалась в изменении температурозависимых характеристик материала.

3. Используемые типы конечных элементов соответствуют расчетным требованиям?

Как было показано в подразделе 3.1 для элементов каркаса, имитируемых балочными элементами, были назначены конечные элементы В31. А для панелей – S4R (редуцированные оболочечные конечные элементы). Данные элементы применяются повсеместно при решении разнообразных модельных задач механики. Особенно то, что касается применения структурированной конечно-элементной сетки для оболочек.

4. Повышение разрешения конечно-элементной сетки обеспечивает необходимую точность?

Как отмечалось в подразделе 3.1 в целях верификации расчета МКЭ необходимо сравнивать результаты численного эксперимента для сеток разной плотности. Для этого, во-первых, было введено дифференцирование разрешения внутри КЭМ. Панелированным элементам конструкции назначалась наибольшая внутри отдельной КЭМ плотность конечных элементов, ввиду большего их относительного веса в конструкции отсека (см. подраздел 3.2). При этом плотность внутри ЗТВ была выше базовой в оболочке (см. Рисунок 2.3). Каждый элемент каркаса конструкции, в зависимости от протяженности профиля имели от 20 до 50 конечных элементов для базовой КЭМ. Во-вторых, для верификации расчетов глобальный размер конечного элемента для панелей исходной уменьшался втрое (с 15 до 5). Для каркаса количество конечных элементов увеличилось на ~50%.

На Рисунке 4.1 показано сравнение распределения значений действующих напряжений и прогибов для верхней панели КТС №4 в конечно-элементных сетках разного разрешения. Как видно из иллюстрации ниже, трехкратное уменьшение глобального размера привело к 10-кратному увеличению конечных элементов, а значит и к увеличению времени расчета (537 с против 3307 с в данном примере). Как было показано анализе, в Главе 1, необходимо искать компромисс между качеством численного результата и оперативностью его получения.

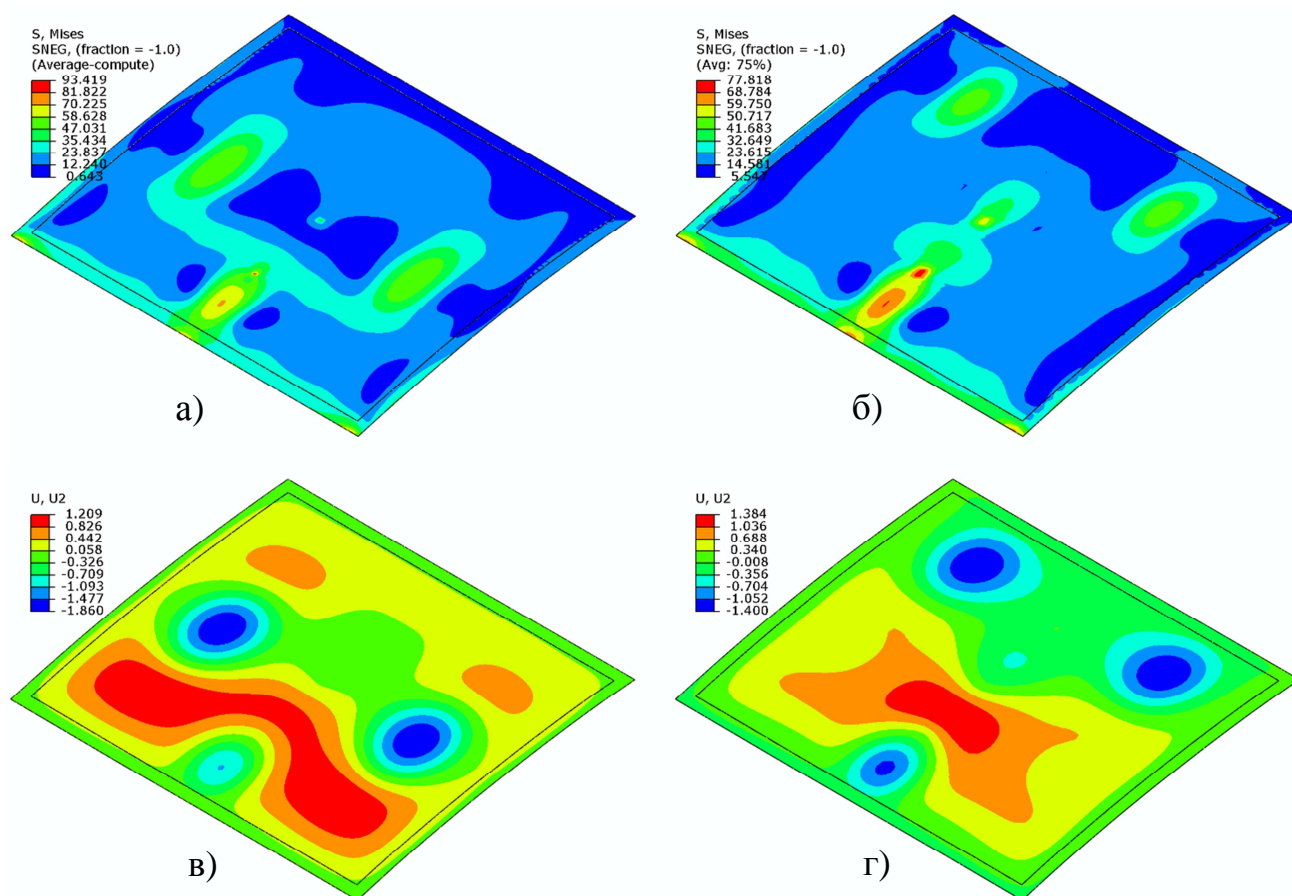


Рисунок 4.1 – Сравнение НДС верхней панели КТС №4.

Сверху показано распределение напряжений по Мизесу S , МПа (а,б);
внизу показаны распределения вертикальных прогибов U_2 , мм (в,г).

а), в) – количество конечных элементов верхней панели: 40538,
суммарное количество конечных элементов: 147843;

б), г) – количество конечных элементов верхней панели: 4384,
суммарное количество конечных элементов: 15940;

Из Рисунка 4.1 следует, что основные изменения НДС коснулись нерегулярных зон конструкции (мест крепления стоек). Сместившиеся зоны максимальных напряжений и прогибов в регулярной части практически не изменились по значению. Это может быть исключено из рассмотрения, поскольку не исследовалось дифференцирование толщин верхней панели по ее площади при оптимизации массы.

5. Есть ли разрывы в конечно-элементной сетке?

Нет, таких разрывов при внутренней проверке препостпроцессором не было обнаружено.

6. *Приложенные нагрузки физичны по месту приложения, направлению и величине?*

Нагрузки были взяты близкими к реальным для оценки критических нагрузок. А поскольку сравнение происходило по относительным значениям достигнутых сил, то величины по модулю исходных сил не имеют значения. Направление силовых потоков соответствует реальным.

7. *Правильно ли применены граничные условия?*

Все граничные условия, заданные в КЭМ, соответствуют расчетной модели.

8. *Правильно ли обеспечено соединение и условия контакта в сборке КЭМ?*

Поскольку рассматривалась сварная конструкция с ЗТВ, имитирующие швы (Ар)ДЭС, то была обеспечена безусловная, жесткая связь (тип «Tie») между элементами каркаса и панелями, а также в местах стыка элементов каркаса.

9. *Статическая нагрузка от собственного веса вызывает ожидаемые реакции?*

В контексте представленного исследования весовые нагрузки от массы сварного отсека не учитывались.

10. *Есть ли ошибки или предупреждающие сообщения?*

Все ошибки, возникшие в процессе анализа и расчетных шагов были устранены, для обеспечения возможности проведения стабильного расчета.

11. *Уравновешены ли приложенные нагрузки?*

Все механические нагрузки уравновешены согласно расчетной схемы (см. Рисунок 3.8).

12. *Величины и направление деформаций КЭМ близки к НДС реальной конструкции? Согласуются ли они с данными ручного расчета?*

В разделе 4.3 проведено сравнение между численным и аналитическим расчетами моделей.

13. *Насколько высоки градиенты напряжений в области одного конечного элемента?*

В Рисунке 4.1 (на правой верхней иллюстрации) наблюдается умеренно-высокие градиенты напряжений в точке крепления одной из стоек к верхней па-

нели. Такой локализацией напряжений можно пренебречь вследствие того, что в реальных конструкциях в данных зонах всегда присутствует иное распределение материала. Данное распределение проявляется в дополнительном усилении места сварного соединения, осуществляемое по конструктивным соображениям.

14. Выполняются ли естественные граничные условия для НДС?

Да, выполняются, поскольку напряжение по нормали к свободной поверхности для расчетной верхней панели принимает около нулевые значения.

4.2. Валидация расчетной модели

Как было определено выше, после верификации расчетов осуществляют проверку достоверности результатов расчета. Другими словами, для фазы валидации необходимо произвести натурную отработку или найти решение в существующих экспериментах и сравнить полученные результаты. В интересах валидации расчетной модели была проанализирована работа [76]. В данном исследовании выводится приближенное аналитическое решение задачи о прямоугольной пластине, упруго опертой по краю, при действии произвольной распределенной нагрузки. Панель на упругом основании является широко распространенной расчетной моделью конструктивных элементов объектов строительства, машиностроения, приборостроения, авиастроения, судостроения и т.д. К таким моделям относят и классическую модель Винклера, чьим именем впоследствии назвали критерий упругости опоры – коэффициент жесткости постели [57].

Как известно, аналитические решения являются альтернативными по отношению к решениям численным, рассмотренным в данном диссертационном исследовании, т.е. полученным численными методами, если для расчетов ответственных объектов требуется подтверждение достоверности полученных результатов. Схема в [76] хорошо согласуется с идеализацией, изложенной в диссертации, где нижняя панель сварного отсека может быть представлена, как пластина на двухпараметрическом упругом основании. В качестве упругих опор здесь выступают ребра смежных панелей (Рисунок 4.2).

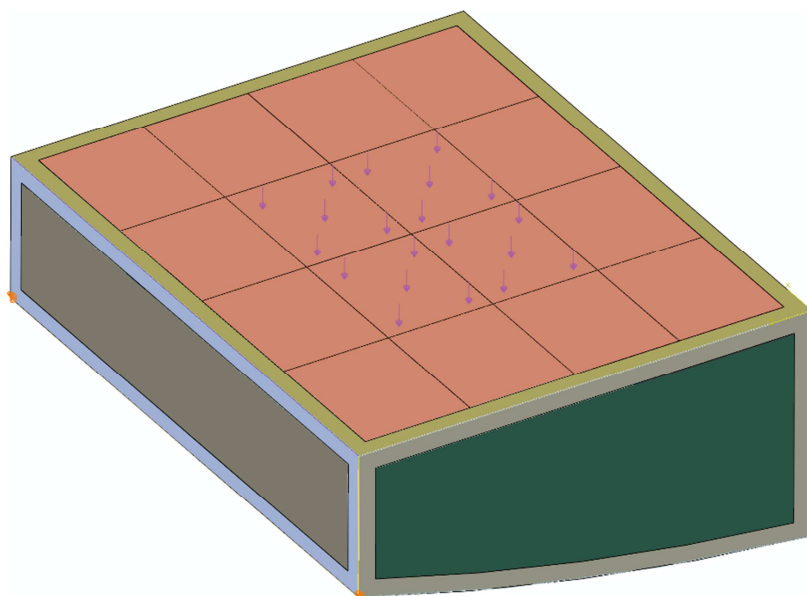


Рисунок 4.2 – Схема модификации сварного отсека для валидации модели

Таким образом, проведя несложную модификацию расчетной модели панель приведена в относительное соответствие с моделью из означенного аналитического исследования для проведения сравнительного расчета (размер панели $1000 \times 800 \times 15$ мм). Результат представлен на Рисунке 4.3.

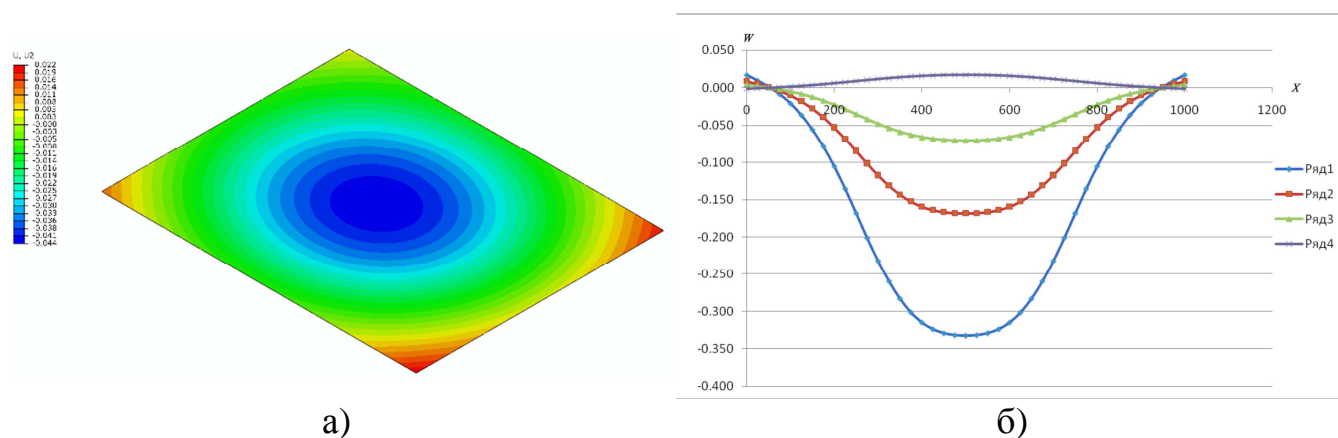


Рисунок 4.3 – Сравнение распределения прогибов упруго опертой пластины, мм:
 а) распределение прогибов численной модели;
 б) распределение прогибов по аналитическому решению [76]

Как видно из представленной иллюстрации есть сходимость результатов между численным и аналитическим решениями по направлению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования разработана методика для решения практической задачи оптимизации массы сварного отсека сверхзвукового самолета. Создана методика проектирования конструкций сварных отсеков с учетом: характеристик материалов, типа элементов конструкции и их геометрических моделей, типа технологического процесса, последовательности сборки-сварки.

При проведении исследований получены следующие результаты, обладающие научной новизной и практической ценностью:

- разработан алгоритм проектирования и оптимизации сварных отсеков сверхзвуковых самолетов, отличительной чертой которого является учет конструктивно-технологических особенностей;
- разработаны геометрическая и численная модели конструкции отсека цельносварного агрегата с учетом нелинейностей, с помощью которых был проведен анализ поведения сварной конструкции в условиях комбинированного нагружения;
- впервые разработан способ структурирования конструктивно-технологических схем сварных отсеков на этапе разработки изделия в критериальном пространстве «конструкция-технология», используя который удалось определить правильное направление для выбора оптимальной КТС сварного отсека сверхзвукового самолета;
- получены графические и табличные зависимости критерия эффективности от конструктивно-технологических переменных КТС сварного отсека, позволившие выбрать оптимальный вариант КТС при учете функционального ограничения;
- даны практические рекомендации по учету назначения сварного отсека и его технологического типа при выборе оптимальной КТС.

Использование разработанной методики позволит *сократить сроки разработки сварных авиационных конструкций сверхзвуковых самолетов.*

Дальнейшее развитие разработанной методики проектирования сварных конструкций заключены в использовании более сложных конфигураций сварных отсеков-секций, представляющих собой сочетаний поверхностей фигур «конус-цилиндр», «тор-конус» или более сложных. Данное обстоятельство позволит раскрыть влияние сложной геометрии на значение критерия эффективности для рассматриваемой КТС сварной конструкции. Также при этом полезно будет оценить влияние структуры каркаса и вида профиля его элементов на критерий эффективности сварного отсека.

Перспективы использования изложенного в работе подхода, в части конструктивно-технологического проектирования сварных авиационных конструкций сверхзвуковых самолетов, должны быть связаны с рассмотрением большего количества вариантов КТС в направлении технологии в критериальном пространстве «конструкция – технология». Таким примером могут явиться усложненные сочетания последовательных (или одновременных) этапов сборки, формализованных в виде проектного маршрута сварки, как это было представлено в работах [29], [51]. Последнее особенно актуально в сочетании со сложными видами нагружения (сжатие и сдвиг) при учете функциональных ограничений, описанных в подразделах 2.1 и 3.4. При оценке влияния выбранного конструкционного материала и их сочетаний следует не забывать о функциональном ограничении на допустимые сварные соединения по свариваемости.

Совокупность рассмотренных КТС на раннем этапе разработке всего изделия позволит сократить количество разрабатываемой конструкторской документации, а также должна позволить избежать дорогостоящей экспериментальной отработки сварной конструкции на стадии производства.

В виду того, что наблюдается тенденция в создании авиационных изделий с заданным сроком службы, другим важным направлением исследований по теме в дальнейшем может служить рассмотрение актуального вопроса по проектированию конструкции под заданный ресурс. Для сварных авиационных конструкций, имеющих ограниченные возможности по количеству допускаемых подварок, данное требование особенно важно.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей работе используются следующие сокращения и обозначения:

АК – авиационный комплекс

АрДЭС – аргоно-дуговая электросварка

ДТП – директивно-технологический процесс

ЗТВ – зона термического влияния

КСС – конструктивно-силовая схема

КТС – конструктивно-технологическая схема

КТР – конструкторско-технологическое решение

КЭМ – конечно-элементная модель

ЛА – летательный аппарат

МКЭ – метод конечных элементов

НДС – напряженно-деформированное состояние

ПО – программное обеспечение

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина

РЭС – роликовая электросварка

СДС – сверхзвуковой деловой самолет

СПС – сверхзвуковой пассажирский самолет

СТП – сварка трением с перемешиванием

ТЭС – точечная электросварка

ЭЛС – электронно-лучевая сварка

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисов Б.С., Мейлах А.И. Сварка в самолетостроении. Сварные конструкции МИГов. М.: РусАвиа, 2007. 360 с.
2. Ендогур А.И. Проектирование авиационных конструкций. Проектирование конструкций деталей и узлов М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. 540 с.
3. Ендогур А.И. Конструкция самолетов. Конструирование агрегатов планера. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2012. 496 с.
4. Пановко Я.Г. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. 288 с.
5. Ендогур А.И. Конструкция самолетов. Конструирование деталей и узлов. М.: Изд-во МАИ, 2013. 556 с.
6. Кан С.Н., Свердлов И.А. Расчет самолета на прочность. М.: Машиностроение, 1966.
7. Проектирование конструкций самолетов / Войт Е.С., Ендогур А.И., Мелик-Саркисян З.А., Алявдин И.М. М.: Машиностроение, 1987. 416 с.
8. Зайцев В.Н., Рудаков В.Л. Конструкция и прочность самолетов. Киев: Издательское объединение «Вища Школа», Головное издательство, 1978. 488 с.
9. Феофанов А.Ф. Строительная механика авиационных конструкций. М.: Машиностроение, 1964. 284 с.
10. Ромашевский А.Ю., Климов В.И. Строительная механика самолета. М.: Изд-во МАИ, 1965.
11. Уманский А.А. Строительная механика самолета. М.: Оборонгиз, 1961. 529 с.
12. Гиммельфарб А.Л. Основы конструирования в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1980. 367 с.
13. Niu Michael C.Y. Airframe structural design. Practical Design Information and Data on Aircraft Structures. Hong Kong: CONLIMIT PRESS LTD, 1988. 612 p.
14. Niu Michael C.Y. Airframe stress analysis and sizing. Second Edition. Hong Kong: CONLIMIT PRESS LTD, 1999. 795 p.

15. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 2003. 448 с.
16. Задачи оптимизации элементов авиационных конструкций в курсе сопротивления материалов / Горшков А.Г., Костров В.И., Ложкин О.Б. и др. М.: Изд-во МАИ, 1987. 81 с.
17. Хертель Г. Тонкостенные конструкции. М.: Машиностроение, 1965. 528 с.
18. Голубев И.С., Самарин А.В. Проектирование конструкций летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.
19. Климов В.И., Булычев Л.А. Строительная механика оболочек вращения. М.: Изд-во МАИ, 1984. 56 с.
20. Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов (с основами физической химии). М.: Высшая школа, 1977. 392 с.
21. Талыпов Г.Б. Сварочные деформации и напряжения. М.: Машиностроение, 1973. 280 с.
22. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 с.
23. Goldak J.A., Akhlaghi M. Computational welding mechanics. New York: Springer, 2005. 321 p.
24. Píštěk A., Pešák M., Optimization of stiffened panel with the help of mathematical programming experimental verification // 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS2008, pp. 1-13.
25. Сплав 1570С — материал для герметичных конструкций перспективных многоразовых изделий РКК «Энергия» / А.В. Бронз, В.И. Ефремов, А.Д. Плотников, А.Г. Чернявский // Космическая техника и технологии. 2014. №4 (7). с. 62-67.
26. Шиганов И.Н., Шахов С.В., Холопов А.А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов авиационного назначения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012, 6 (6), с. 34-50.
27. Сагалевиц В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1974. 248 с.

28. ГОСТ Р 50995.0.1-96 Технологическое обеспечение создания продукции. Основные положения. М.: Стандартинформ, 1996. 16 с.
29. Murakawa H., Deng D., Ma N., Wang J., Applications of inherent strain and interface element to simulation of welding deformation in thin plate structures // Computational Materials Science, 51 (2011), pp. 43-52.
30. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения. Методы их устранения. М.: Машиностроение, 1968. 236 с.
31. Ланин А.А. Подходы к конструктивно-технологическому проектированию сварных узлов мощных энергетических установок // Теплоэнергетика. 2012. № 3. с. 43-49.
32. Кондратьев А.В., Харченко М.Е. Синтез рациональных конструктивно-технологических решений композитных форморазмеростабильных конструкций космического назначения // Актуальные научные исследования в современном мире, №9-1 (17), 2016, с. 18-24.
33. Сафронов В.С. Учет требований живучести конструкций при проектировании плоских панелей летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение, №11, 2015, с. 55-60.
34. Окерблом Н.О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций. М.: Машиностроение, 1964. 420 с.
35. Майзель В.С., Навроцкий Д.И. Сварные конструкции. М.: Машиностроение, 1973. 304 с.
36. Винокуров В.А., Николаев Г.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование. М.: Высшая Школа, 1990. 446 с.
37. Проектирование сварных конструкций в машиностроении. Под ред. Куркина С.А., Винокуров В.А., Вершинский С.В. и др. М.: Машиностроение, 1975. 376 с.
38. Моисеев В.Н., Куликов Ф.Р., Кириллов Ю.Г. и др. Сварные соединения титановых сплавов. М.: Metallurgy, 1979. 248 с.

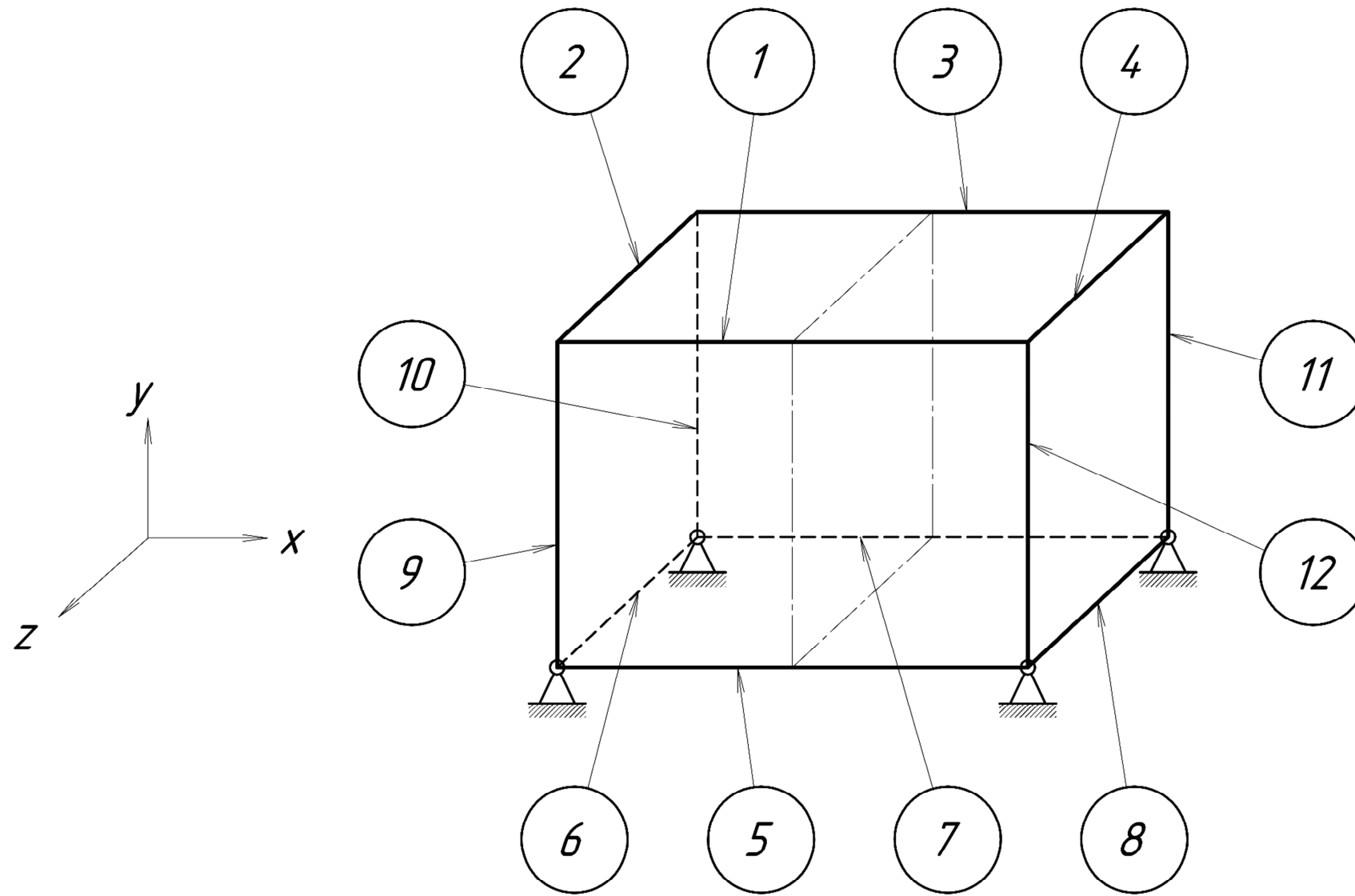
39. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций / С.А. Куркин и др.; под ред. С.А. Куркина, В.М. Ховова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 464 с.
40. Lindgren L.-E. Computational welding mechanics. Thermomechanical and microstructural simulations, Woodhead, 2007. 231 p.
41. Серенко А.Н., Крумбольдт М.Н., Багрянский К.В. Расчет сварных соединений и конструкций. М.: Высшая Школа, 1977. 336 с.
42. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М.: Мир, 1976.
43. Zelenin M.N., Mikhailov V.S., Zhivotovsky R.P. Optimization of Assembly and Welding of Complex 3D Structures on the Base of Modeling with Use of Finite Elements Method // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, Vol. 8, №9, 2014, pp. 1600-1603.
44. Бессонов Л.В., Кузнецова Т.А., Чумакова С.В. О численной реализации метода последовательного изменения параметров при расчете напряженно-деформированного состояния пологих оболочек // Чебышевский сборник, 2016, Т.17, №3 (59), с. 28-37.
45. Неделин В.Г. Анализ конструктивно-технологических решений складных рулей с учетом требований аэроупругой устойчивости // Труды МАИ, 2012, №52.
46. Парафесь С.Г. Методы структурно-параметрической оптимизации конструкции беспилотных летательных аппаратов. М.: МАИ-Принт, 2009. 316 с.
47. Бабкин А.С. Автоматизированное построение маршрута изготовления сварных конструкций с применением графовых моделей // Известия ТГУ. Компьютерные технологии в соединении материалов, №2, 2008, с. 196-202.
48. Michaleris P., DeBicari A., Prediction of Welding Distortion // Welding Journal, 1997, 76 (04), pp. 172-181.

49. Голоднов А.И., Козлова О.Н. Влияние остаточного напряженного состояния на устойчивость сжатых элементов из труб // Металлические конструкции, №4, Т.13 (2007), с. 181-186.
50. Пантелеев А.В., Евдокимова М.Д. Методы «роевого» интеллекта в задачах оптимизации параметров технических систем // Научный вестник МГТУ ГА. 2017, №20(2), с. 6-15.
51. Tsai C.L., Park S.C., Cheng W.T. Welding distortion of a thin-plate panel structure // Welding Journal, 1999, 05, pp. 156-165.
52. Voutchkov I., Keane A.J., Bhaskar A., Olsen T.M., Weld sequence optimization: The use of surrogate models for solving sequential combinatorial problems // Computational Methods Appl. Mech. Eng., 194 (2005), pp. 3535–3551.
53. Islam M., Buijck A., Rais-Rohani M., Motoyama K., Simulation-based numerical optimization of arc welding process for reduced distortion in welded structures // Finite Elements in Analysis and Design, 84 (2014), pp. 54–64.
54. Сугаков В.А. Проектирование сжатых трехслойных сотовых конструкций минимального веса с учетом конструктивно-технологических ограничений // Ученые записки ЦАГИ, Т.5, 1974, №1, с. 66-75.
55. Ларичев Е.А., Сафронов В.С. Оптимальное проектирование композиционных оболочек типа отсека корпуса летательного аппарата при сложном термосиловом нагружении // Авиакосмическое приборостроение, 2013, №3, с. 22-27.
56. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 с.
57. Власов В.В. Устойчивость упругих систем. Устойчивость стержней. М.: Изд-во МАИ, 1979. 74 с.
58. Основы сварки судовых конструкций. С.Б. Андреев, В.С. Головченко, В.Д. Горбач, В.Л. Руссо. СПб.: Судостроение, 2006. 552 с.
59. Мацкевич В.Д. Сборка и сварка корпусов судов. М.: Судостроение, 1968. 402 с.
60. Поплавко М.В. Сварка в самолетостроении. Киев: Оборонгиз, 1939.

61. Сварка в самолетостроении. Кривов Г.А., Рябов В.Р., Ищенко А.Я. и др.; под ред. Б. Е. Патона. Киев: МИИВЦ, 1998. 695 с.
62. Затучный А.М., Ригмант В.Г., Синеокий П.М. Туполев-144. М.: Фонд содействия авиации «Русские Витязи», 2015. 552 с.
63. Yiecheng Sun, Howard Smith, Review and prospect of supersonic business jet design // Progress in Aerospace Sciences, Vol. 90, April 2017, pp. 12-38.
64. Основы синтеза систем летательных аппаратов. А.А. Лебедев, В.Н. Баранов, В.Т. Бобронников и др.: под ред. А.А. Лебедева. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
65. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. М.: Высшая школа, 1989.
66. ГОСТ 21890-76 Фюзеляж, крылья и оперение самолетов и вертолетов. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1976. 11 с.
67. Меркулов И.Е., Ендогур А.И. Создание модели сварного отсека сверхзвукового самолета с учетом конструктивно-технологической схемы // Труды МАИ, 2017, №94, с. 30.
68. Кузнецов К.А. Перехватчик МиГ-31. Сорок лет в воздухе // Крылья Родины, №3-4, 2018, с. 78-93.
69. Совенко А. «Черные птицы» стратосферы // Авиация и Время, №4, 2007, с. 4-20, 35-37.
70. Вигдорчик С.А. Технологические основы проектирования и конструирования самолетов. М.: Изд-во МАИ, 1976.
71. Кюхеман Д. Аэродинамическое проектирование самолетов. М.: Машиностроение, 1983. 656 с.
72. Меркулов И.Е., Ендогур А.И. Оптимизация сварных конструкций сверхзвуковых самолетов с учетом конструктивно-технологических схем. В кн.: 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2017». 20–24 ноября 2017 года. Москва. Тезисы. Типография «Люксор», 2017. с. 48-49.

73. Моделирование напряженно-деформированного состояния при сварке стыковых соединений средствами программного комплекса Abaqus / В.М. Прохоренко, Б.О. Яхно, Д.В. Прохоренко // Вісник Національного Технічного Університету України «Київський Політехнічний Інститут». Серія: Машинобудування, 2011. №61 (01). с. 135-139.
74. Riks E. An incremental approach to the solution to the solution of buckling anssnapping problems // International Journal of Solids and Structures, 15, 1979, pp. 524–551.
75. Братухин А.Г. Современные авиационные материалы: технологические и функциональные особенности. М.: АвиаТехИнформ XXI век, 2001. 420 с.
76. Большаков А.А. Прямоугольная пластина, упруго опертая по контуру // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2011. Вып. 4 (19).

ПРИЛОЖЕНИЕ А**Формализация поперечных сечений (F_i)
элементов каркаса сварного отсека**

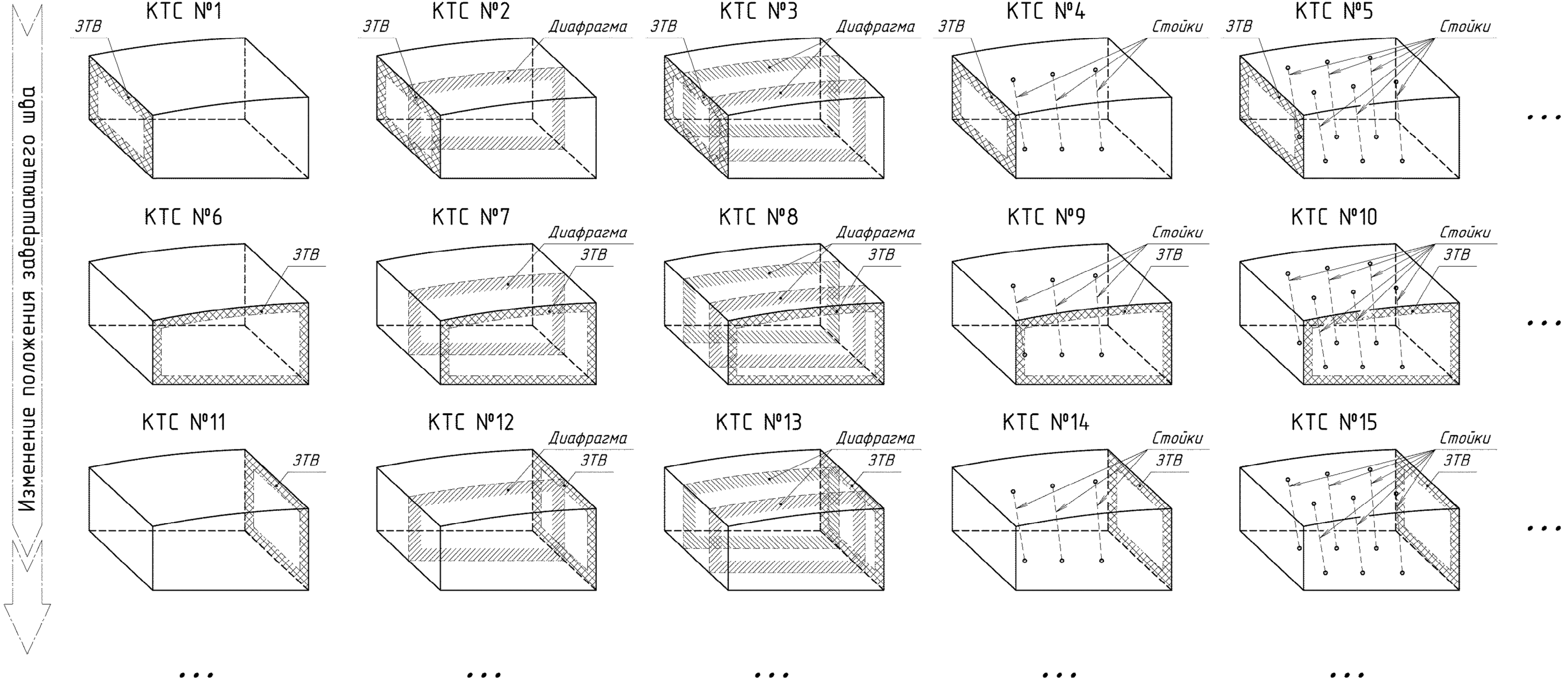


1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Выборка КТС исследования

Изменение конструктивно-силовой схемы сварного отсека



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Копия акта о внедрении результатов исследования

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Инженерного Центра

АО «РСК «МиГ»



А.В. Терпугов

«20» июня 2019 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы

Меркулова Илья Евгеньевича

«20» июня 2019 г.

Комиссия в составе:

Председатель:	Заместитель начальника ИЦ - Начальник КБ	Литвинович Алексей Георгиевич
Члены комиссии:	Зам. главного конструктора по планеру - начальник отдела	Пришлецов Евгений Андреевич
	Зам. главного конструктора по системам управления	Оболенский Юрий Геннадьевич

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Методика проектирования сварных конструкций сверхзвуковых самолетов с учетом конструктивно-технологических схем», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в проектно-конструкторской деятельности Инженерного Центра АО «РСК «МиГ» в виде:

1. Методик проектирования и моделирования сварных конструкций сверхзвуковых самолетов;

2. Табличных и графических зависимостей основных параметров сварных конструкций от конструктивно-технологической схемы;
3. Технических предложений по выполнению схемных решений, а также оценки их весовой эффективности, позволившей выявить предпочтительную конструктивно-технологическую схему;
4. Практических рекомендаций по выбору рациональной конструктивно-технологической схемы сварного отсека в соответствии с его назначением.

Использование указанных результатов позволяет сократить сроки и повысить качество результатов проектирования авиационных конструкций.

Председатель:



А.Г. Литвинович

Члены комиссии:



Е.А. Пришлецов



Ю.Г. Оболенский