

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники» МАИ
Ендогур Аскольд Иванович

Официальные оппоненты: **Вермель Владимир Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор, Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», начальник научно-технического центра научно-производственного комплекса

Логунов Леонид Петрович – кандидат технических наук, Акционерное общество «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева», начальник отдела КБ «Салют»

Ведущая организация: Публичное акционерное общество «Компания «Сухой», г. Москва

Защита диссертации состоится 24 октября 2019 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.10 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=105363

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 года.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 212.125.10,

к.т.н., доцент

Денискина Антонина Робертовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 характерны 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*. Недостатками сварного соединения являются следующие:

- 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 удовлетво-

рение требованиям прочности, жесткости и массы сварных конструкций невозможно. 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».

Методы проектирования и расчета авиационных конструкций основываются на работах следующих авторов отечественной школы авиастроения: Феофанов А.Ф., Ромашевский А.Ю., Климов В.И., Уманский А.А., Ендогур А.И., Войт Е.С., Пановко Я.Г., Кан С.Н., Свердлов И.А., Зайцев В.Н., Рудаков В.Л., Гиммельфарб А.Л. Среди зарубежных источников в этой области необходимо отметить работы Niu M.C.-Y.

Методикам расчета оптимальных статически неопределимых конструкций посвящены работы Лизина В.Т., Пяткина В.А., Горшкова А.Г., Пановко Я.Г., Хертеля Г., Голубева И.С., Самарина А.В., Гиммельфарба А.Л. 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 исследований Петрова Г.Л., Талыпова Г.Б., Рыкалина Н.Н. 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, имеющей в своей основе классическую формулу Рыкалина для теплового источника. Однако, такие модели сложны в применении, поскольку воспроизводят нестационарный тепловой процесс, учитывающий все входящие и исходящие 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, такие методики разработаны Эндогуром А.И., Пановко Я.Г., Горшковым А.Г., Píšťek A., Rešák M. 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 одновременно 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 [Бронз А.В., Ефремов В.И. и др.], обладающими новыми качествами прежде недоступными. Стоит также отметить бурное развитие перспективных методов сварки трением с перемешиванием, диффузионной и лазерной сварок [Бронз А.В., Ефремов В.И. и др.], [Шиганов И.Н., Шахов С.В., Холопов А.А.].

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) [Денисов Б.С.].

Существуют технологические особенности сварных конструкций, влияющие на последующую эксплуатацию, обслуживание и ремонт. *Общепринято, что ремонт конструкции производится по технологии, с помощью которой она была создана. Ремонт сварных швов (подварка) неблагоприятно сказывается на ресурсе сварных соединений, и, по возможности, должен быть сведен 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 заслуживает отдельного развернутого исследования.

Как известно, 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) [Сагалевиц В.М.]. Последний метод наиболее эффективен после снятия «усиления»

шва. Наклеп или нагартовка нагруженных поверхностей могут 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». Использование такого определения 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, для 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 значимость 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), в том числе разработанными Феофановым А.Ф., Ромашевским А.Ю., Уманским А.А., 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, который 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») [Murakawa H., Deng D., Ma N., Wang J.], имеющий в своей основе метод фиктивных сил, разработанный отечественной школой в 1960-х гг. [Винокуров В.А.]. 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

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.

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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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, сформулирована его научная новизна, показана теоретическая и практическая значимость.

В **первой** главе приведено исследование проблем рационального конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций, и определено место приложения 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 конструк-

ций, 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 минимизации монтажных усилий. 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. Таким образом, поставленная задача по учету указанных факторов на этапе проектирования сварных отсеков сверхзвуковых самолетов решается при создании новой расчетной модели сварного отсека и модифицированной методики ее оптимизации. При этом учитываются: модели материалов, технология сварки и последовательность сборки, КСС и т.п. Анализ существующих или применяемых ранее сверхзвуковых авиационных систем позволил классифицировать объект исследования по различным идентификационным признакам.

Была предложена схема формализации геометрии типовых сварных отсеков сверхзвуковых самолетов (Рисунок 1).

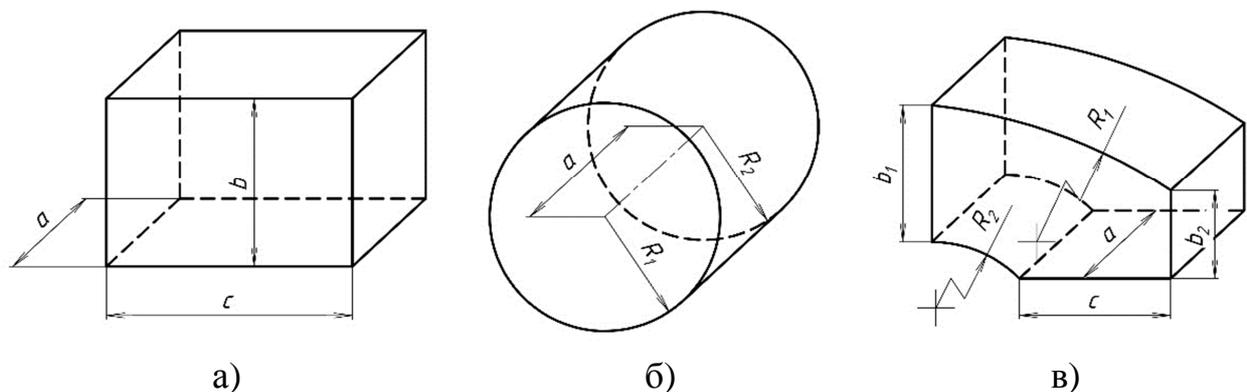


Рисунок 1 – Формообразование типовых отсеков: а) параллелепипед (частный случай призмы); б) цилиндр (частный случай конуса); в) комбинации «параллелепипед + цилиндр»

Вторая глава посвящена разработке и описанию методики проектирования рациональных сварных отсеков сверхзвуковых самолетов с учётом конструктивно-технологических схем (Рисунок 2).

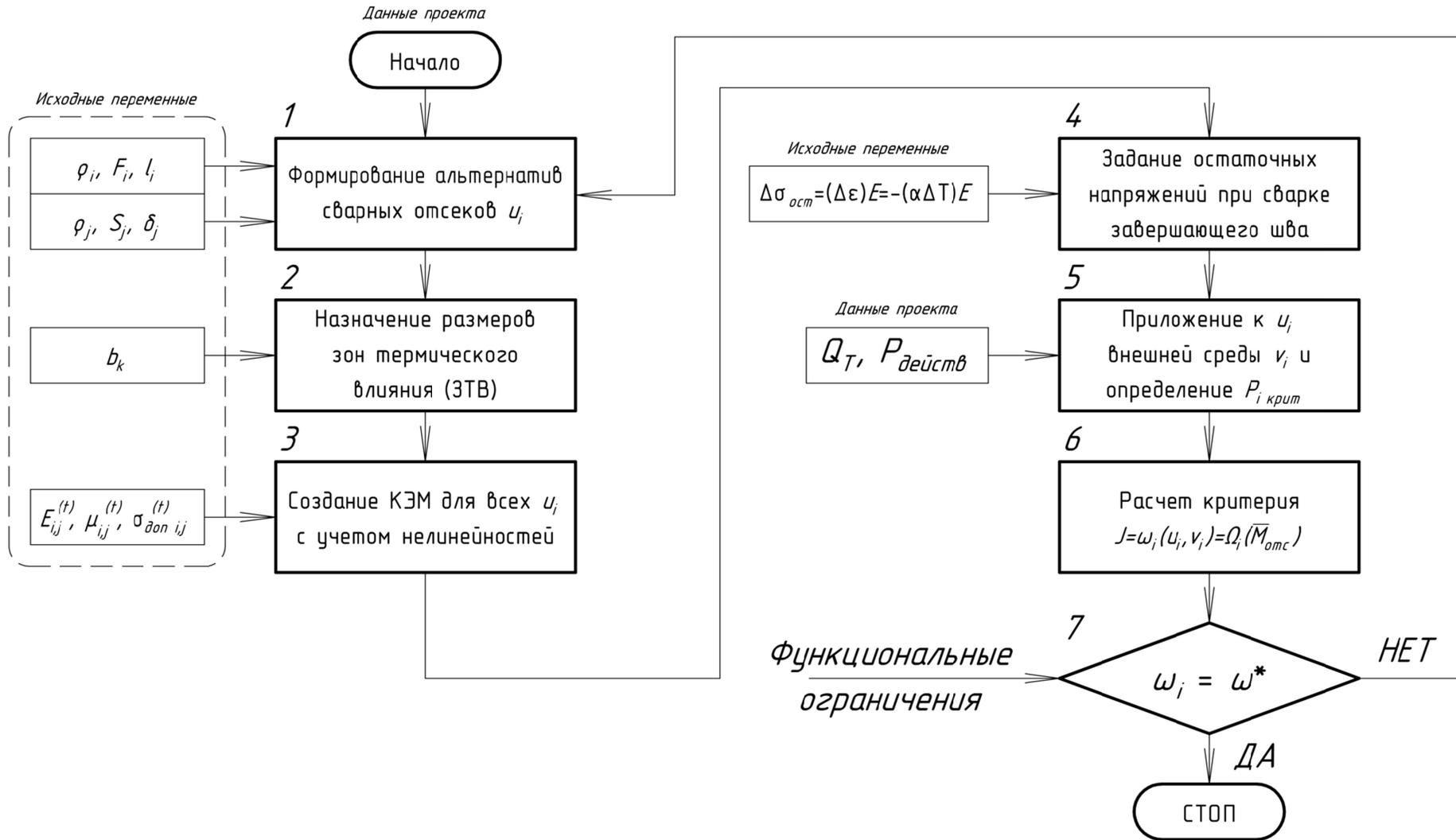


Рисунок 2 – Структурная схема алгоритма проектирования и оптимизации сварного отсека с учетом его КТС

Разработан алгоритм последовательности создания модели отсека (Рисунок 3) проектирования сварных конструкций авиационных агрегатов с учетом нелинейностей и технологических особенностей.

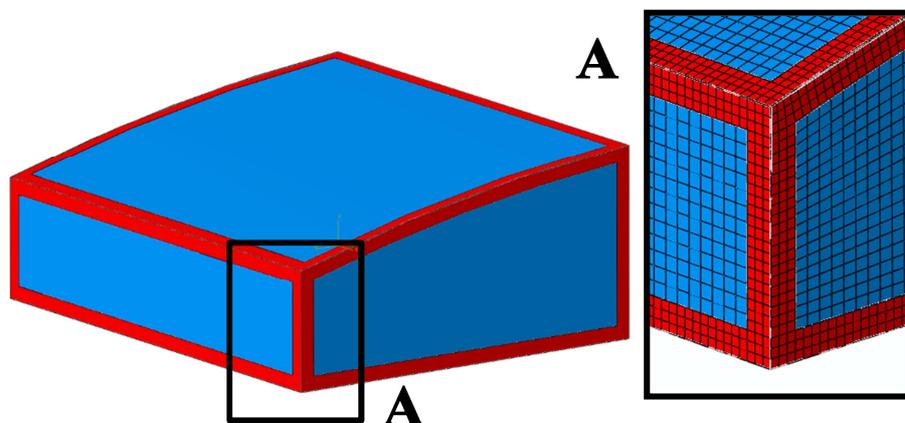


Рисунок 3 – Пример геометрической модели внешнего контура сварного отсека. Красные зоны, прилегающие к ребрам модели отсека – ЗТВ. Зона А – пример КЭМ сварного отсека. Балочные конечные элементы для деталей каркаса не визуализированы. Красными оболочечными конечными элементами обозначены ЗТВ

Предложен способ организации конструктивно-технологических схем сварных отсеков в критериальном пространстве «конструкция - технология» (Рисунок 4).

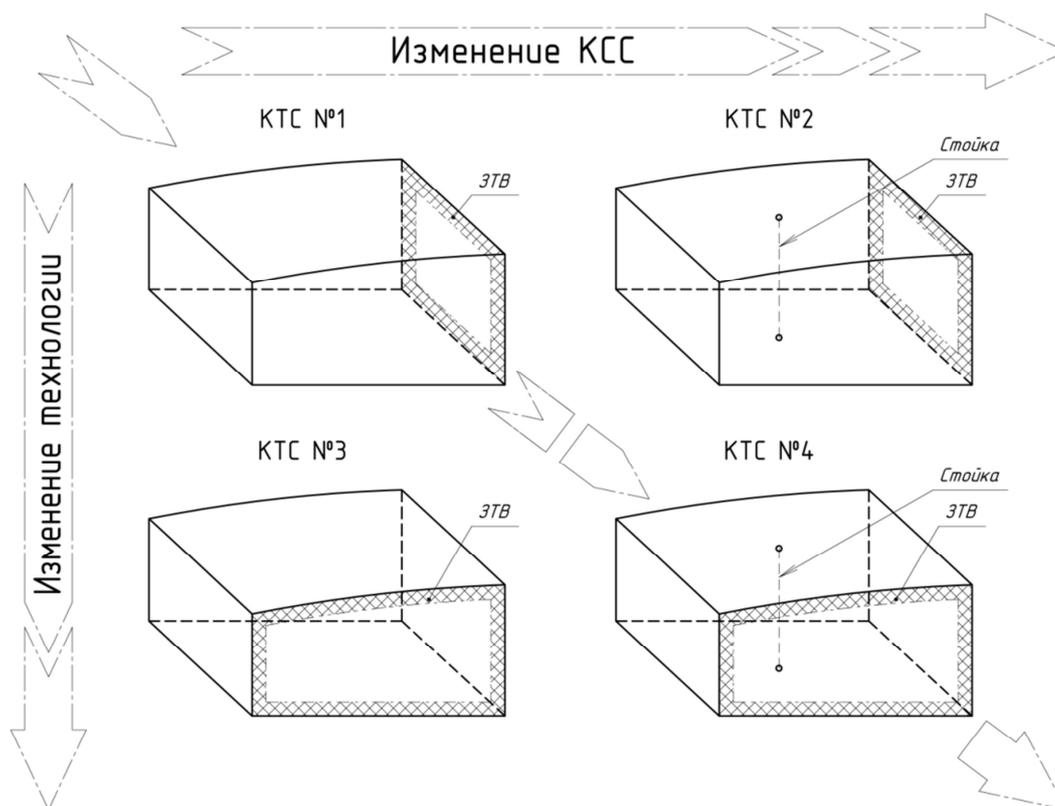


Рисунок 4 – Пример набора из 4-х альтернатив КТС сварного отсека

Во второй главе были определены параметрические и функциональные ограничения при разработке конструкции сварного отсека, а также предложен обобщенный критерий оптимальности для оценки качества полученной КТС сварного отсека.

$$J = \max \left\{ \bar{P}_{\text{крит}} / \bar{M}_{\text{отс}} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{\min} \leq S_j \leq S_{\max} \\ l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max} \\ F_{\min} \leq F_i \leq F_{\max} \\ \delta_{\min} \leq \delta_j \leq \delta_{\max} \end{array} \right\},$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\text{отс}} \leq M_0 \\ y \leq f \\ \partial y / \partial P \geq 0 \end{array} \right.$$

где:

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

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

f – ограничение прогиба для элементов каркаса;

$\partial y / \partial P \geq 0$ – функциональное ограничение, указывающее на необратимость знака производной прогиба по приращению нагрузки.

В **третьей** главе проведена оценка работоспособности предложенной методики на примере оптимизации по критерию массы для конструкции сварного отсека фюзеляжа сверхзвукового самолета (Рисунок 5).

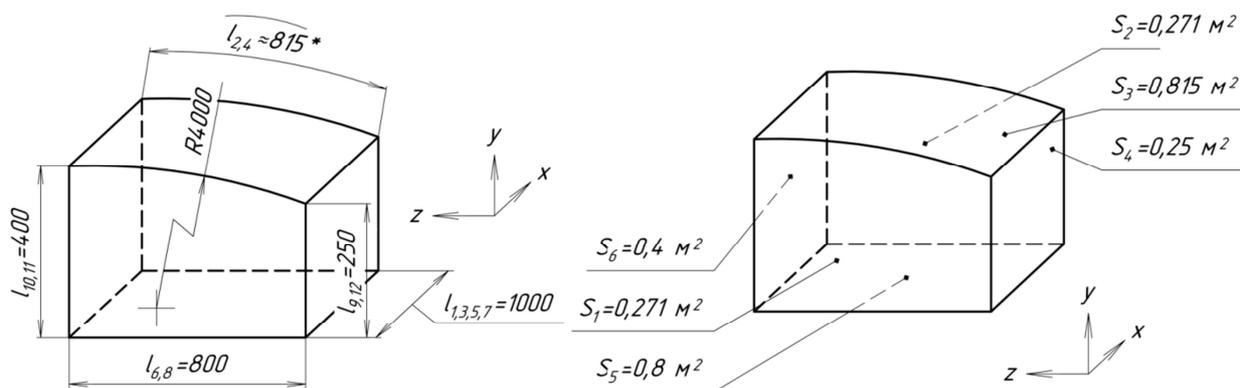


Рисунок 5 – Схема расположения и обозначения элементов каркаса и панелей сварного отсека

Разработанная модель сварного отсека сверхзвукового самолета позволила оценить влияние конструктивных и технологических факторов на НДС сжатой верхней панели отсека. Было показано, что учет остаточных напряжений уменьшает весовую эффективность панелей на 20%, изменяет картину распределения напряжений (деформаций) по площади панелей и уровень «критического» НДС отсека (Рисунок 6).

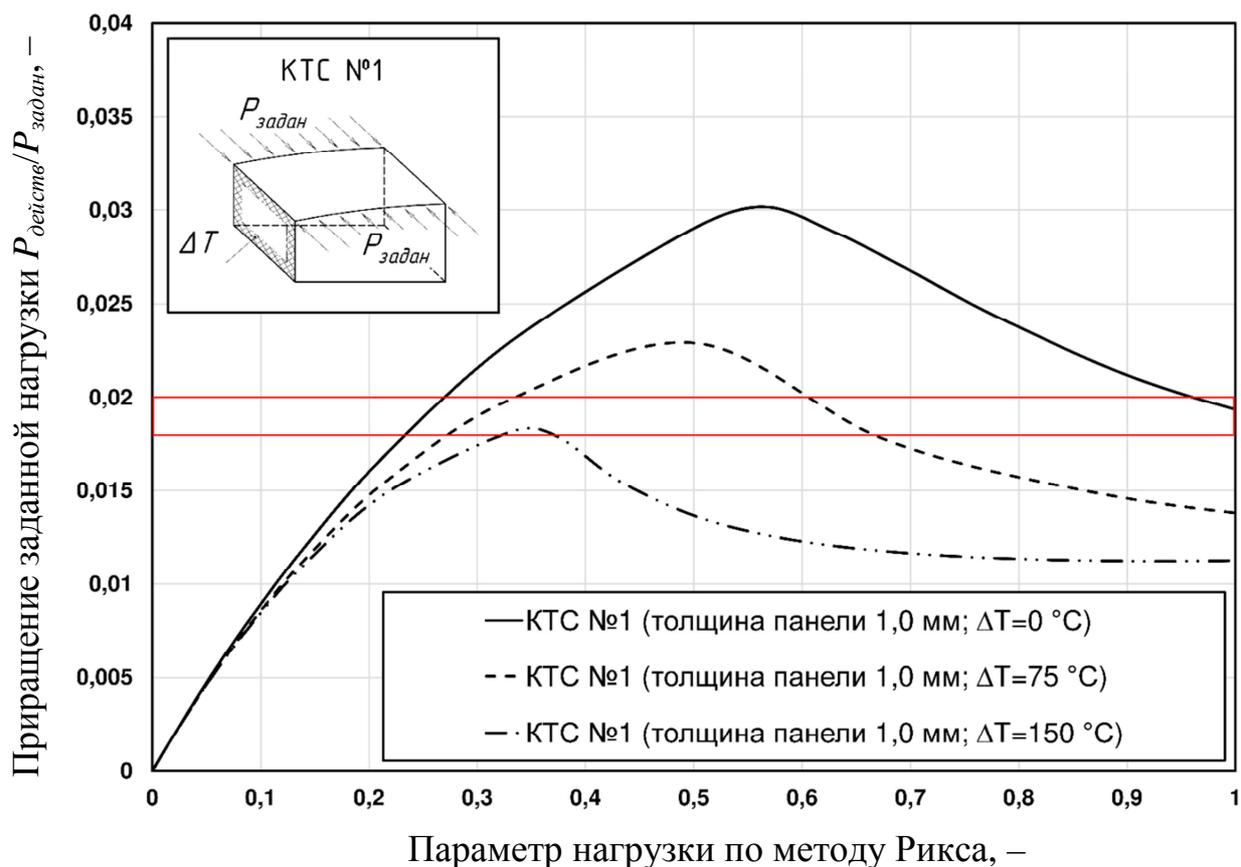


Рисунок 6 – Влияние остаточных сварных напряжений на изменение критического состояния НДС сварного отсека с приведенной толщиной верхней панели $\delta_3 = 1$ мм

На Рисунке 7 показано, что на несущую способность верхней панели заметное влияние оказывает параметрическая оптимизация подкрепляющих элементов. Увеличение толщины стойки отвечает заметным увеличением несущей способности, таким образом, что позволяет сохранить 50% заложенных остаточных напряжений в качестве резерва для последующей оптимизации технологии.

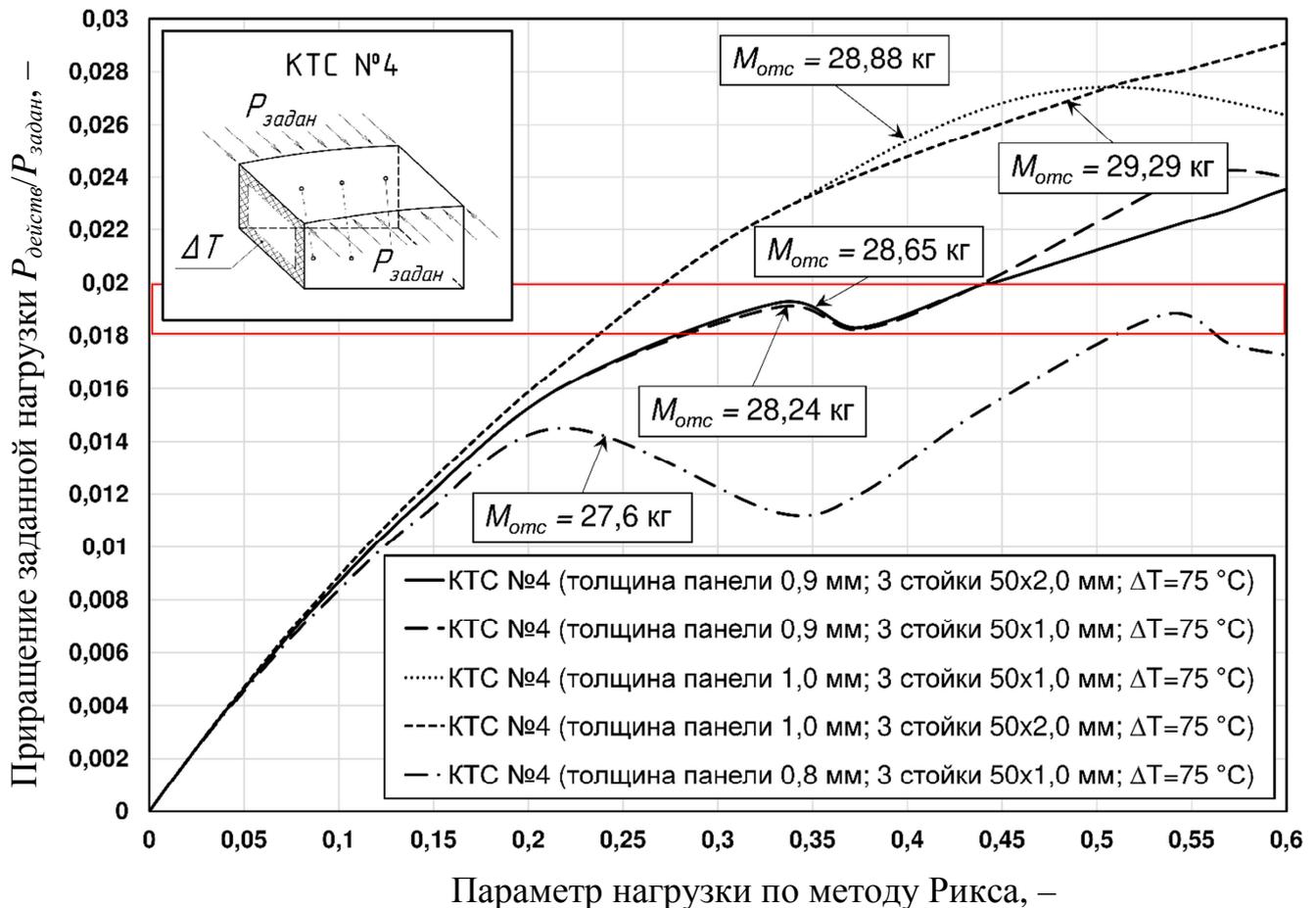


Рисунок 7 – Влияние структурно-параметрической оптимизации КТС №4 сварного отсека на изменение его несущей способности и массу конструкции отсека

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.

Предложенная методика позволила определить рациональные конструктивные параметры панелей сварного отсека по критерию минимума массы для 15-ти КТС и достигнутые значения величин снижения массы сварного отсека по отношению к базовой варьируется от 0,8 до 4,5% (Таблица 1).

В исследовании показано, что диапазон достигаемого эффекта от оптимизации при использовании такой методики будет тем больше, чем больше альтернатив КТС проанализировано.

Таблица 1 – 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 | |

В четвертой главе проведена верификация расчетов с ответами на основные верификационные вопросы. Представлено сравнение результатов расчета с разной плотностью конечно-элементных сеток. Проведена валидация адаптированной математической модели сварного отсека сверхзвукового самолета в части сравнения результирующих прогибов, полученных по расчету прямоугольной пластины, упруго опертой по контуру, разработанной и исследованной Большаковым А.А. (Рисунок 8).

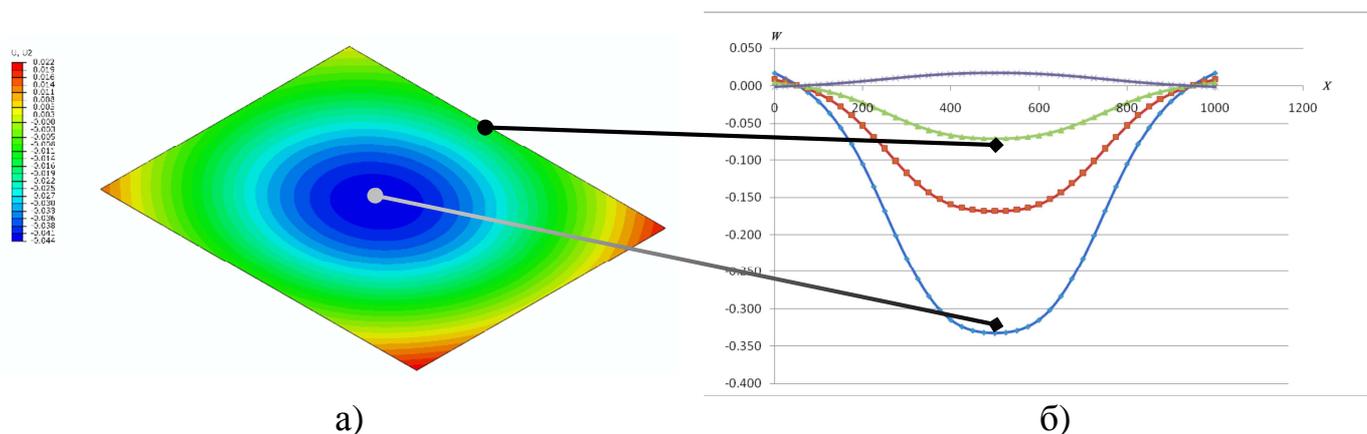


Рисунок 8 – Сравнение распределения прогибов упруго опертой пластины, мм:
 а) распределение прогибов численной модели;
 б) распределение прогибов по аналитическому решению, полученных Большаковым А.А.

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 ее дальнейшему использованию.

Приложения к диссертационной работе включают следующие материалы:

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

Автор считает своим долгом выразить благодарность к.т.н. О.Б. Пащенко и д.т.н. В.В. Овчинникову за полезные замечания по содержанию рукописи и ценные советы, данные в процессе ее подготовки.

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 заключается в использовании более сложных конфигураций сварных отсеков-секций, представляющих собой сочетания поверхностей «конус-цилиндр», «тор-конус» или более сложных. Данное обстоятельство позволит полнее раскрыть влияние сложной топологии 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 представ-

лено в работах Murakawa H., Deng D., Ma N., Wang J., Tsai C.L., Park S.C., Cheng W.T. Последнее наиболее актуально в сочетании со сложными видами нагружения (сжатие и сдвиг) при учете функциональных ограничений, описанных в соответствующих подразделах диссертации. При оценке влияния выбранных конструкционных материалов и их сочетаний следует учитывать функциональные ограничения по свариваемости.

Совокупность рассмотренных КТС на раннем этапе создания всего изделия позволит сократить количество разрабатываемой конструкторской документации и 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 может служить рассмотрение актуального вопроса проектирования конструкции под заданный ресурс. Для сварных авиационных конструкций с ограниченными возможностями по количеству допускаемых подварок данное требование особенно важно.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях.

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов работ по диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук:

1. **Меркулов И.Е., Ендогур А.И.** Создание модели сварного отсека сверхзвукового самолета с учетом конструктивно-технологической схемы // Труды МАИ, 2017, №94, – С. 30.
2. **Меркулов И.Е., Ендогур А.И.** Разработка методики проектирования рациональных сварных отсеков сверхзвуковых самолетов с учётом их конструктивно-технологических схем // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2019. №57, – С. 32-43.

Печатные публикации:

3. **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.
4. **Меркулов И.Е.** Разработка методики проектирования и оптимизации сварных отсеков сверхзвуковых самолетов с учётом конструктивно-технологических схем / Меркулов И.Е., Ендогур А.И. // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2019 г.: в 4 ч. / редкол.: Э.А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – Ч. 3. – С. 123-124.