



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Тюсиф

Погарская Татьяна Аркадьевна

**Разработка методов выбора расположения и
порядка установки временных крепежных
элементов при математическом моделировании
сборки авиационных конструкций**

05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт – Петербург
2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: **Лупуляк Сергей Валерьевич**, кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Баркалов Константин Александрович**, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры математического обеспечения и суперкомпьютерных технологий института информационных технологий, математики и механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (г. Нижний Новгород)
Головченко Евдокия Николаевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела программного обеспечения высокопроизводительных вычислительных систем и сетей федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (г. Москва)

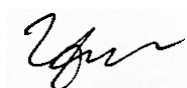
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «13» октября 2021 года в 18:00 на заседании диссертационного совета У.05.13.18.1 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, 2 учебный корпус, аудитория 265).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан « _____ » _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.05.13.18.1,
доктор технических наук, профессор



Б.С. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Во многих областях машиностроения, таких как, например, авиастроение, кораблестроение или автомобильная промышленность, важной составляющей производственного процесса является сборка конструкций с использованием точечных соединений (сварка, клёпочные, болтовые соединения и проч.). При этом к качеству сборки предъявляются достаточно жесткие требования. На данный момент только часть производственных процессов механизирована и автоматизирована, многие этапы выполняются вручную, что увеличивает их трудоемкость и временные затраты. Одним из таких этапов в авиастроении является предварительная сборка, в ходе которой части соединяются временными крепежными элементами для последующего сверления или других операций. Большое влияние на процесс сборки оказывает не только количество и расположение крепежных элементов, но и порядок их установки, поскольку для компенсации возникающих при соединении деформаций зачастую может потребоваться корректировка технологического процесса. Подобные сложности возникают и в других отраслях машиностроения, например, при сборке железнодорожных вагонов, буровых платформ, танкеров, автомобилей.

В авиастроении процесс сборки является весьма сложным и включает в себя множественные операции по сверлению, а также временную сборку конструкции путём установки специальных временных крепёжных элементов (крепежей) в отверстия, позиции которых определены заранее, чтобы соединить детали, уменьшить между ними зазор (расстояние по нормали между поверхностями соединяемых деталей) и предотвратить его открытие при последующих операциях. Сборка может занимать около 40% всего времени производства из-за большого объема выполняемых вручную операций и непрерывного контроля технологического процесса. Предварительная сборка создает основу для обеспечения надежного контакта между соединяемыми деталями. Несмотря на их большой размер, требования к качеству сборки являются очень строгими, а зазор между соединяемыми поверхностями деталей (конечный, результирующий зазор) должен находиться в определённых пределах после установки временного крепежа и в ходе операций сверления. Из-за вышеперечисленных факторов полный контакт во всей области соединения не может быть достигнут – всегда имеет место некоторый начальный зазор. Этот зазор в дальнейшем может стать причиной вибраций во время сверления новых отверстий, из-за чего возникает их несоосность, а также увеличивается риск попадания стружки между соединяемыми деталями. Всё это может привести к повышенным механическим напряжениям в конструкции самолёта, в дальнейшем вызвать усталостные явления (в частности, развитие трещин) и послужить причиной аварийных ситуаций. Поэтому, с одной стороны, необходимо уменьшить

число крепежных элементов для ускорения производства, но, с другой стороны, установить их достаточное количество для сведения начального зазора до установленного технологией уровня.

Уменьшение числа крепежных элементов при временной сборке, а соответственно и числа выполняемых операций, при сохранении высоких стандартов качества, является важным способом оптимизации производственного процесса. Одним из наиболее эффективных путей решения данной задачи является использование математического моделирования на разных стадиях сборочного процесса. Моделирование процесса сборки влечет за собой необходимость проведения серийных расчетов, так как изменение конфигурации расстановки крепежей влечет изменение конечного зазора. Это обусловлено тем, что каждая деталь в процессе производства и транспортировки неизбежно подвергается деформациям. В то же время изделия внутри одной серии собираются по одним и тем же шаблонам, что не позволяет учесть индивидуальные особенности каждого элемента, однако качество сборки должно оставаться наилучшим, поэтому для учета всевозможных вариаций собираемых деталей необходимо использовать статистический анализ. Под шаблоном (или расстановкой) понимается установка некоторого количества крепежных элементов в часть свободных отверстий в зоне соединения деталей, положения которых определены заранее и не могут быть изменены. Наличие predetermined позиций для возможной установки крепежей делает задачу комбинаторной.

Кроме того, неправильный порядок установки крепежных элементов может привести к возникновению изгибов деталей и критическому увеличению зазора между деталями. Таким образом, необходимо моделировать установку каждого крепежа поочередно, поскольку результирующий зазор зависит от истории установки. Данное обстоятельство существенно усложняет моделирование процесса сборки и становится оправданным только в том случае, если эффект значительный, например, для достаточно гибких деталей и панелей с большой кривизной (например, панелей фюзеляжа).

Таким образом, актуальной задачей является разработка алгоритма нахождения положения и порядка установки фиксирующих элементов при сборке авиационных конструкций, который бы позволил проводить серийные расчеты за приемлемое время без потери качества получаемых решений.

Цели и задачи исследования

Цель исследования состоит в разработке метода выбора расположения крепежных элементов, а также метода выбора порядка их установки, адаптированных под особенности решаемых задач при сборке авиационных конструкций. В данной работе рассматривается задача оптимизации сборочного процесса с помощью методов математического моделирования – повышение качества соединения и ускорение сборки за счет уменьшения числа и изменения положения временных крепежных элементов.

В ходе работы были поставлены и решены следующие задачи:

1. Постановка задач оптимизации числа, расположения и порядка установки крепежных элементов при сборке авиационных конструкций;
2. Обзор стандартных методов оптимизации для решения поставленных задач;
3. Разработка нового безытерационного метода выбора расположения временных крепежных элементов, основанного на совместном использовании информации о механических свойствах и геометрии соединения;
4. Разработка нового безытерационного метода выбора порядка установки крепежных элементов для известной расстановки, позволяющего наиболее эффективно использовать особенности рассматриваемых задач;
5. Реализация разработанных методов в виде комплекса программ на языке С++ и их интеграция в качестве дополнительной функциональности в существующий программный комплекс «ASRP», предназначенный для математического моделирования сборочных процессов;
6. Верификация разработанных методов на модельных задачах;
7. Применение разработанных методов к решению практических задач сборки, в том числе для множества начальных состояний, полученных в результате измерений.
8. Исследование эффективности разработанных методов по сравнению со стандартными методами, используемыми для решения задач оптимизации сборки.

Научная новизна результатов

1. Впервые сформулированы математические постановки задач оптимизации числа, расположения и порядка установки крепежных элементов при сборке авиационных конструкций.
2. Разработан новый безытерационный метод определения положения фиксирующих элементов при сборке авиационных конструкций, позволяющий учитывать механические свойства скрепляемых деталей.
3. Разработан новый безытерационный метод определения порядка установки фиксирующих элементов при сборке.

Теоретическая и практическая значимость работы

В работе впервые сформулированы математические постановки задач оптимизации числа, расположения и порядка установки крепежных элементов при сборке авиационных конструкций, которые могут быть адаптированы и к

другим задачам о точечном соединении частей (сварка, болтовое соединение и т.д.).

Разработаны и верифицированы методы выбора расположения и порядка установки временных крепежных элементов. Их безытерационная структура позволяет проводить массовые расчеты на полномасштабных моделях реальных соединений, в том числе с учетом исходных данных, полученных при измерениях большого количества типовых соединений. Кроме того, сравнение разработанных методов с наиболее распространёнными типами методов оптимизации (эвристические методы; методы оптимизации черного ящика; алгоритмы, основанные на полном переборе) позволяет прояснить вопрос об их эффективности применительно к рассматриваемым задачам сборки.

Разработанные методы выбора расположения и порядка установки временных крепежных элементов были реализованы в виде компьютерных программ на языке программирования C++ и интегрированы в виде дополнительной функциональности в программный комплекс «ASRP» моделирования сборки, принятый к использованию компанией Airbus SAS. Эти методы составляют его оптимизационное вычислительное ядро и позволяют определять расположение и порядок установки крепежных элементов на основе как смоделированных данных, так и реальных измерений.

Методы исследований и достоверность результатов

При выполнении данной работы использовались методы математического моделирования, вычислительной математики и математической статистики. Также затронуты вопросы теории решения контактных задач, вычислительной геометрии и задач упаковки. Расчётные процедуры реализованы в виде комплекса компьютерных программ на языке программирования C++.

Достоверность полученных результатов подтверждается решением модельных задач. Эффективность разработанных методов подтверждается сравнительным анализом со стандартными методами решения подобного рода задач. Результаты определения порядка установки крепежных элементов верифицируются путем сравнения с точным решением, полученным с помощью полного перебора всех возможных вариантов.

Положения, выносимые на защиту

1. Математические постановки задач оптимизации числа, расположения и порядка установки крепежных элементов при сборке авиационных конструкций.
2. Новый безытерационный метод поиска расположения крепежных элементов при сборке авиационных конструкций.
3. Новый безытерационный метод определения порядка установки крепежных элементов при сборке авиационных конструкций.

4. Результаты исследования эффективности разработанных методов по сравнению со стандартными методами оптимизации, применимыми к поставленным задачам.
5. Реализация разработанных методов в виде комплекса программ на языке C++ и их добавление в существующий программный комплекс «ASRP» для математического моделирования сборочных процессов в качестве расширяющей функциональности.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, список литературы, 74 рисунка, 7 таблиц. Общий объем работы составляет 121 страницу. Список литературы включает 70 библиографических наименований.

Апробация результатов исследования

Основные результаты работы докладывались: на конференции с международным участием «Неделя Науки СПбПУ 2015», г. Санкт-Петербург, Россия; на международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России 2018», г. Москва, Россия; на международной конференции «2018 Global Smart Industry Conference», г. Челябинск, Россия; на конференции с международным участием «Неделя Науки СПбПУ 2018», г. Санкт-Петербург, Россия; на международной конференции «SAE 2019», г. Бордо, Франция; на международной конференции «International Youth Conference On Electronics, Telecommunications And Information Technologies» 2019, г. Санкт-Петербург, Россия; на международной конференции «53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 2020», г. Чикаго, США; на международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России 2020», г. Москва, Россия; на семинарах научно-исследовательской лаборатории «Виртуально-имитационного моделирования», 2016-2020 (Санкт-Петербург, Россия).

Работа поддержана грантами Правительства Санкт-Петербурга для аспирантов ВУЗов и академических институтов в 2019 и 2020 годах, субсидией Правительства Санкт-Петербурга молодым ученым в 2020 году. По теме работы опубликовано 11 работ, в том числе 9 в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, из которых 6 рецензируются в SCOPUS, 2 – в Web of Science.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационного исследования, сформулирована поставленная цель и перечислены основные задачи исследования, обозначены научная новизна, его теоретическая и практическая значимость, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе приводится постановка задачи квадратичного программирования, возникающей при моделировании процесса сборки деформируемых конструкций и используемая в дальнейшем для оценки рассматриваемых шаблонов крепежных элементов:

$$\min_{u \in U_A} \left(\frac{1}{2} u^T K_C u - F_C^T u \right), \quad (1)$$

где u – вектор перемещений, $U_A = \{u: g^{res} = g - A^T u \geq 0\}$ – допустимое множество, определяемое условием непроникновения, g^{res} – вектор результирующего зазора, F_C – вектор приложенных нормальных сил (от крепежных элементов) в зоне возможного возникновения контакта; K_C – редуцированная матрица жесткости; A – линейный оператор, определяющий нормальное направление к контактной поверхности, g – начальный зазор в зоне стыка, представляющий собой начальное расстояние по нормали между узлами, которые могут прийти к контактному взаимодействию.

Эта задача относится к особому классу контактных задач, которые имеют следующие характерные особенности:

- Зона возможного возникновения контакта известна заранее (далее – *зона стыка*, рисунок 1);
- Касательные перемещения малы по сравнению с нормальными вследствие установки крепежных элементов, что дает возможность рассматривать модель контакта “узел в узел”;
- Ввиду небольших касательных смещений, трение можно исключить из рассмотрения;
- Задача является стационарной;
- Напряженно-деформированное состояние каждой соединяемой детали описывается линейной теорией упругости.

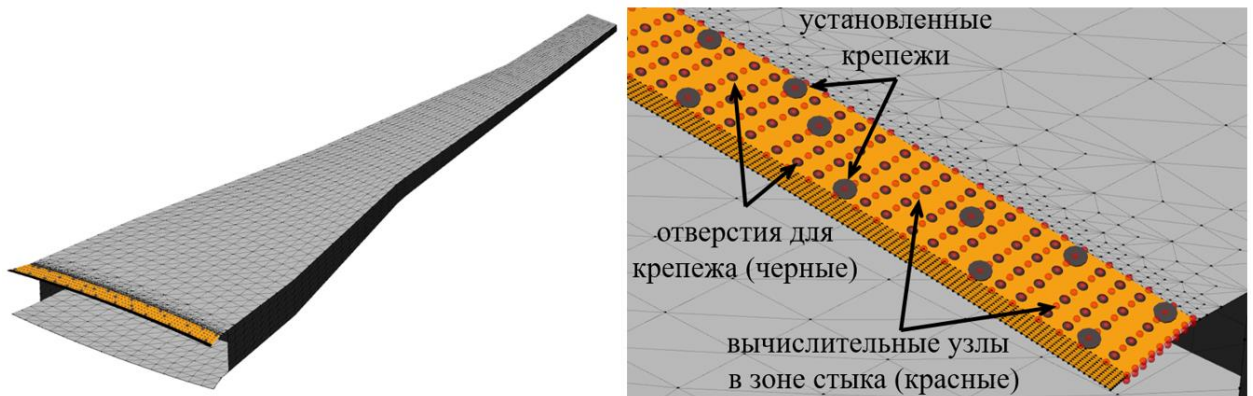


Рисунок 1 – Слева представлена зона стыка крыла и фюзеляжа (оранжевая полоса), справа – элементы модели сборки

Также в первой главе рассматривается контактная задача с учетом касательных смещений для моделирования последовательной установки крепежных элементов. Порядком установки будем называть порядок отверстий, согласно которой устанавливается крепеж. Вектор перемещений u и последовательность номеров дополняется касательными компонентами, а допустимое множество U_A – ограничениями после установки каждого

крепёжного элемента. Эти ограничения делают решение зависимым от порядка установки и не позволяют изменить конфигурацию шаблона без пересчёта с самого первого установленного элемента.

На основе задачи квадратичного программирования формулируется специальная модель сборки (рисунок 1), включающая в себя

- вычислительные узлы в зоне стыка $\{c_i\}_{i=1, n_u}$, n_u – их общее число;
- матрицы A и K_C , описывающие свойства и геометрию соединения;
- положения отверстий для установки временных крепёжных элементов в зоне стыка $H = \{h_i\}_{i=1, n_h}$, где n_h – их общее число;
- расположение крепёжных элементов, установленных в отверстиях (расстановка или шаблон) в виде набора занятых отверстий $H^0 = \{h_i^0\}_{i=1, n_f} \subset H$, где n_f – общее количество установленных крепёжных элементов;
- вектор начального зазора g (или множество начальных зазоров, которые будем называть облаком $G = \{g_k\}_{k=1, n_g}$, где n_g – количество зазоров в облаке). Начальный зазор между частями в большинстве случаев определяется как случайное поле. Начальные зазоры моделируются на основе статистического анализа доступных измерений и допусков или как анизотропные реализации случайных полей с заданными характеристиками амплитуды и коэффициента шероховатости.

Сформулируем постановки задач оптимизации числа, расположения и порядка установки крепёжных элементов при сборке авиационных конструкций.

Задача 1. Минимизация максимального значения зазора. Для заданного числа крепёжных элементов с заданными силами требуется определить их расположение в имеющихся отверстиях так, чтобы оно обеспечивало минимальное значение максимального зазора в вычислительных узлах зоны стыка для всех начальных зазоров из облака. Величина максимального зазора g_{max}^{res} для некоторой расстановки H^0 и облака начальных зазоров G может быть вычислена как

$$g_{max}^{res}(H^0) = \max_{g_k \in G} \left(\max_{i=1, n_u} g_i^{res}(g_k, H^0) \right). \quad (2)$$

Тогда задача оптимизации формулируется следующим образом: требуется найти такой шаблон H_*^0 из n_* элементов, что

$$H_*^0 = \arg \min_{H^0, |H^0|=n_*} (g_{max}^{res}(H^0)). \quad (3)$$

Задача 2. Минимизация вероятности дефекта. Для заданного числа крепёжных элементов с заданными силами определить их расположение в имеющихся отверстиях так, чтобы оно обеспечивало минимальную вероятность дефекта в зоне стыка для всех начальных зазоров из облака. Будем называть вычислительный узел “дефектным”, если значение результирующего зазора, вычисляемое для заданной расстановки крепёжей H^0 и начального зазора g , превосходит некоторое заданное значение g_* (рисунок 2).

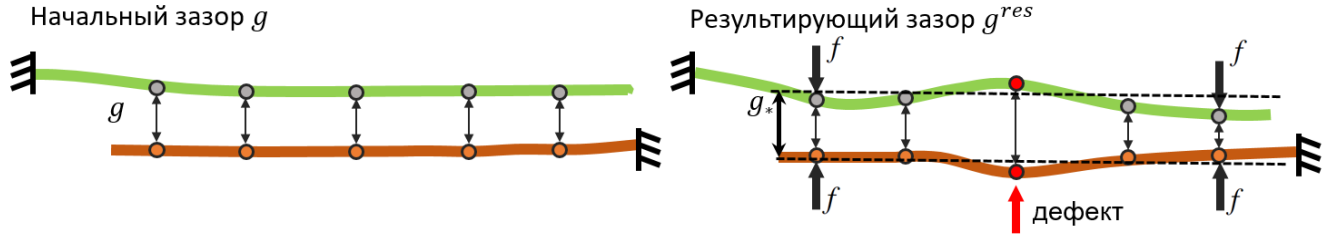


Рисунок 2 – Результирующий зазор превосходит некоторое заданное значение g_*

Вероятность дефекта P_d определяется как отношение количества дефектных узлов к общему количеству узлов в модели

$$P_d(H^0, g) = \frac{\sum_{i=1}^{n_u} \theta(g_i^{res}(g, H^0) - g_*)}{n_u}, \quad (4)$$

где $\theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ – ступенчатая функция Хевисайда. В случае оптимизации по облаку начальных зазоров G , выражение (4) примет вид:

$$P_d(H^0, G) = \frac{\sum_{k=1}^{n_g} \sum_{i=1}^{n_u} \theta(g_i^{res}(g_k, H^0) - g_*)}{n_g n_u}. \quad (5)$$

Тогда задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом: найти такую расстановку H_*^0 из n_* крепежных элементов, что

$$H_*^0 = \arg \min_{H^0, |H^0|=n_*} (P_d(H^0)). \quad (6)$$

Задача 3. Поиск расстановки с минимальным числом элементов. Требуется найти расстановку H_*^0 минимального размера, обеспечивающую значение результирующего зазора во всех вычислительных узлах не более некоторого значения g_*

$$n_f(H_*^0) = \min_{\substack{H^0, |H^0|=n_f \\ g_{max}^{res}(H^0) \leq g_*}} (n_f). \quad (7)$$

Задача 4. Поиск порядка установки крепежных элементов, обеспечивающего минимально возможное значение максимального зазора. Для заданного шаблона H^0 из n_f крепежных элементов требуется определить порядок их установки, обеспечивающий минимально возможное значение максимального результирующего зазора. Обозначим за J_{n_f} множество всевозможных порядков установки крепежей в шаблоне:

$$J_{n_f} = \{\pi_j\}_{j=1, n_f!} = \left\{ \{\pi_j^k\}_{k=1, n_f} \right\}_{j=1, n_f!}. \quad (8)$$

Для некоторого порядка установки π_j шаблона H^0 после установки первого крепёжного элемента π_j^1 и решения контактной задачи с начальным зазором g и вектором приложенных сил F_{1C} , соответствующим нагрузке от π_j^1 ,

результатирующий зазор $g^{res}(g, \pi_j^1)$ будет выступать в качестве начального зазора при установке следующего крепёжного элемента π_j^2 :

$$\min_{u \in U_A^1} \left(\frac{1}{2} u^T K_C u - F_{2C}^T u \right), \quad (9)$$

$U_A^1 = \left\{ u: g^{res} = g^{res}(g, (\pi_j^1)) - A^T u = g^1 - A^T u \geq 0 \right\}$ – допустимое множество с дополнительным ограничением на относительные касательные перемещения. Вектор F_{2C} соответствует нагрузкам от двух установленных крепёжных элементов. Предположим, что был установлен $n_f - 1$ крепёжный элемент. Тогда величина максимального зазора g_{max}^{res} может быть вычислена по формуле

$$g_{max}^{res}(\pi_j) = \max_{i=1, n_u} g_i^{res} \left(g^{n_f-1}, (\pi_j^1, \pi_j^2, \dots, \pi_j^{n_f}) \right), \quad (10)$$

где g^{n_f-1} – вектор результирующего зазора после установки $n_f - 1$ крепёжного элемента. В случае облака начальных зазоров соотношение (10) примет вид

$$g_{max}^{res}(\pi_j, G) = \max_{g_k \in G} \left(\max_{i=1, n_u} g_i^{res} \left(g_k^{n_f-1}, (\pi_j^1, \pi_j^2, \dots, \pi_j^{n_f}) \right) \right). \quad (11)$$

Тогда задача поиска наилучшего порядка расстановки π^* формулируется как

$$\pi^* = \arg \min_{\pi^j \in J_{n_f}} \left(g_{max}^{res}(\pi_j, G) \right). \quad (12)$$

Во **второй главе** обсуждаются основные особенности поставленных задач, делается обзор применимых стандартных методов оптимизации и исследуется их эффективность.

К характерным особенностям, накладывающим существенные ограничения на выбор методов их решения, относятся:

1. Крепежи могут быть поставлены только в уже просверленные отверстия, т.е. их потенциальные позиции predetermined заранее, и отверстие может быть либо свободно, либо занято. Эта особенность делает задачу комбинаторной;
2. Необходимо решать времязатратную контактную задачу после каждого изменения конфигурации крепёжных элементов для вычисления конечного зазора;

Данные особенности накладывают существенные ограничения на выбор методов. В реальных задачах число n_h отверстий исчисляется сотнями, а n_f количество крепёжей, которые требуется установить, обычно соответствует половине общего числа отверстий. Перебор всех возможных вариантов с решением контактной задачи для каждого из них не представляется возможным: в случае поиска наилучшей расстановки фиксированного размера необходимо проверить все возможные сочетаний без повторов (в случае, когда порядок установки не учитывается) из n_h по n_f , то есть перебор $C_{n_h}^{n_f} = \frac{n_h!}{n_f!(n_h-n_f)!}$ вариантов (при $n_h \approx 300$ и $n_f \approx 150$ число вариантов составит

порядка $9.3 \cdot 10^{88}$); в случае определения порядка установки для шаблона из n_f элементов, потребуется проверить $n_f!$ вариантов.

Для решения поставленных задач были выбраны следующие четыре метода, как наиболее эффективные при решении задач подобного рода и относящиеся к различным группам методов оптимизации:

1. Метод прямого поиска на адаптивных сетках (Mesh Adaptive Direct Search, MADS);
2. Поиск восхождением (метод локальных вариаций);
3. Генетический алгоритм;
4. Алгоритм имитации отжига.

Выбранные методы анализируются на примерах решения ряда тестовых и практических задач.

В **третьей главе** описывается разработанная методика – *геодезический алгоритм* определения положений крепежных элементов и *метод порядка* определения порядка установки крепежных элементов для уже известной расстановки.

Определение положения крепежных элементов происходит последовательно, но без пересчета результирующего зазора после установки. Общая последовательность действий геодезического алгоритма для некоторой модели сборки, максимально допустимого значения результирующего зазора g_* и числа крепежных элементов n_* может быть представлена в виде следующих шагов:

Шаг 0: инициализировать параметры $k := 1$, $G := \{g_j\}_{j=1, n_g}$ – облако начальных зазоров, H – множество свободных отверстий.

Шаг 1: решить задачу

$$\min_{u \in U_C} \left(\frac{1}{2} u^T K_C u \right), \quad (13)$$

$$U_C = \{u: 0 \leq g_{res}^n \leq g_*\},$$

где K_C – редуцированная матрица жесткости, $g^{res} = g_j - A^T u$, A – линейный оператор, определяющий нормальное направление к контактной поверхности, g – начальный зазор в зоне стыка, и определить множество векторов сил $P = \{p_i\}_{i=1, n_g}$, которые необходимо приложить к соединению для сведения каждого начального зазора из облака G .

Шаг 2: построить граф со значениями трехмерных координат вычислительных узлов в вершинах для дальнейшего вычисления геодезических расстояний.

Шаг 3: разделить вычислительные узлы на непересекающиеся классы $\{H_i\}_{i=1, n_h}$ по количеству отверстий в рассматриваемом соединении (их количество n_h). В множество H_1 входят те вычислительные узлы, для которых отверстие h_1 является ближайшим, в множество H_2 – для которых отверстие h_2 является ближайшим и т.д., то есть $H_i = \left\{ c_j \mid h_i = \arg \min_{k=1, n_h} \|h_k - c_j\| \right\}$. Для

каждого отверстия в зоне установки крепежных элементов определить его вес как сумму сил в вычислительных узлах множества H_i :

$$w_i = \sum_{c_j \in H_i} \tilde{p}^j, \quad i = 1, n_h,$$

где $\tilde{p}^j = \max_{k=1, n_g} \{p_k^j\}$, p_k^j – давление, которое необходимо приложить в узле $c_j \in H_i$ для сведения начального зазора $g_k \in G$.

Шаг 4: первое отверстие \tilde{h}_1 в расстановке определить среди всех свободных отверстий как то, которому соответствует максимальный весовой коэффициент w_i : $\tilde{h}_k := h_i : i = \operatorname{argmax}_{i=1, n_h} w_i$. $H_k^O := \{\tilde{h}_k\}$.

Шаг 5: для каждого свободного отверстия $\forall h \in H \setminus H_k^O$ вычислить геодезическое расстояние $r(h) = \min_{\tilde{h} \in H_k^O} \rho_g(h, \tilde{h})$ до включенных в расстановку H_k^O отверстий (геодезическое расстояние представляет собой длину кратчайшего пути между двумя точками поверхности по этой поверхности).

Шаг 6: $\tilde{h}_{k+1} := h_k = \operatorname{argmax}_{h_i \in H \setminus H_k^O} \{(w_i)^\alpha r(h_i)\}$, $H_k^O := H_k^O \cup \{\tilde{h}_{k+1}\}$.

Шаг 7: $k := k + 1$. Если $k > n_*$, то закончить вычисления, иначе перейти к шагу 5.

Затем в данной главе приводится описание метода определения порядка установки крепежных элементов для уже известной расстановки. Общая идея разработанного метода порядка основывается на следующих соображениях. При решении контактной задачи (1) относительные касательные смещения $\{\tilde{u}_i^T\}_{i=1, n_f}$ отверстий H^O , в которых установлены крепежные элементы, можно рассматривать как эталонные значения, поскольку они соответствуют состоянию минимума энергии соответствующей механической системы. Учет порядка значительно увеличивает требуемое время вычислений, так как теряется коммутативность установки крепежных элементов и множество допустимых решений U_A дополняется новыми ограничениями после установки каждого крепежного элемента.

Последовательность действий алгоритма для специальной модели сборки и некоторого шаблона крепежных элементов $H^O = \{h_1, \dots, h_{n_f}\}$ может быть описана следующим образом.

Шаг 1: Первым устанавливается крепежный элемент в то отверстие шаблона H^O , занятие которого сообщает системе минимум энергии, то есть

$$\tilde{h}_1 = \operatorname{argmin}_{h_i \in H^O} \left(\min_{u \in U_A} \left(\frac{1}{2} u^T K u - f_{h_i}^T u \right) \right), \quad (14)$$

где вектор f_{h_i} советуется силе от крепежного элемента, установленного в отверстие h_i . Допустимое множество должно быть заменено на U_A^1 путем добавления к U_A соответствующего ограничения после установки крепежного элемента, чтобы зафиксировать относительное касательное смещение в соответствующем отверстии.

Шаг 2: предположим, что для k элементов уже определен их порядок установки $H_{order}^O = \{\tilde{h}_1, \dots, \tilde{h}_k\}, k < n_f$, тогда следующий элемент выбирается так, чтобы уменьшить отклонение от эталонного значения :

$$\tilde{h}_{k+1} = \underset{h_i \in H^O \setminus H_{order}^O}{\operatorname{argmin}} |u_i^T - \tilde{u}_i^T| \quad (15)$$

где u^T – вектор относительных касательных смещение, полученный при решении контактной задачи с множеством допустимых решений U_A^k .

Шаг 3: для найденного элемента добавляется порядок его установки

$$H_{order}^O := H_{order}^O \cup \{\tilde{h}_{k+1}\}. \quad (16)$$

Шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока порядок установки всех элементов не будет определен. Данный подход позволяет избежать множественных пересчетов результирующего зазора и существенно сократить время расчетов (решать контактную задачу требуется $n_f + 1$ раз).

В **четвертой главе** приводятся примеры работы геодезического алгоритма и метода порядка на тестовых и реальных моделях. Выполняется сравнение геодезического алгоритма с методами прямого поиска на адаптивных сетках и локальных вариаций (эти методы были выбраны во второй главе для дальнейшего анализа как наиболее эффективные после серии расчетов). Алгоритм имитации отжига не используется для сравнения, поскольку предварительный анализ на тестовых задачах показал, что его случайный характер требует множество вычислительных экспериментов для получения результатов, сравнимых с другими методами. Метод порядка сравнивается с методом полного перебора.

Сравнение разработанного геодезического алгоритма с методами, выбранными в предыдущей главе, показывает его превосходство по времени работы на порядки (~ 1500 раз на практических задачах) без потери в качестве. Такое ускорение стало возможным за счет его безытерационной структуры, не требующей дополнительных вычислений функции цели и решений времязатратной контактной задачи. Численные результаты представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – время работы и результирующий зазор для расстановок из 5 крепежей на тестовом примере, один зазор, 410 вычислительных узлов

Алгоритм	Время работы, с	$g_{max}^{res}(H^*)$, мм
Геодезический алгоритм	5	0.07
MADs с шагом поиска	24.3	0.17
Метод локальных вариаций	32.1	0.07
Генетический алгоритм	45.5	0.07

Таблица 2 – время работы и результирующий зазор для расстановок из 100 крепежей на реальном примере, облако зазоров, 7308 вычислительных узлов

Метод	Время работы	Дефектные узлы, %
Геодезический алгоритм	4.5 мин	0.045
Локальные вариации	7.7 дней	0.049
MADs с шагом поиска	4.6 дня	0.126

Разработанный метод порядка сравнивается с методом полного перебора на примере нескольких реальных задач сборки (соединение панелей фюзеляжа и сборка пилона для крепления двигателя).

Полученные решения для обеих задач отличаются от глобального оптимума не более, чем на 5.3%. Для более детальной оценки полученных результатов были построены гистограммы распределения всех возможных порядков установки крепежей по максимальному значению результирующего зазора. Диапазоны максимальных значений зазора располагаются по оси X, количество всевозможных порядков установки крепежа – по оси Y. Полученное решение в обоих случаях входит в 5 лучших в порядке возрастания значений зазора (рисунок 3).

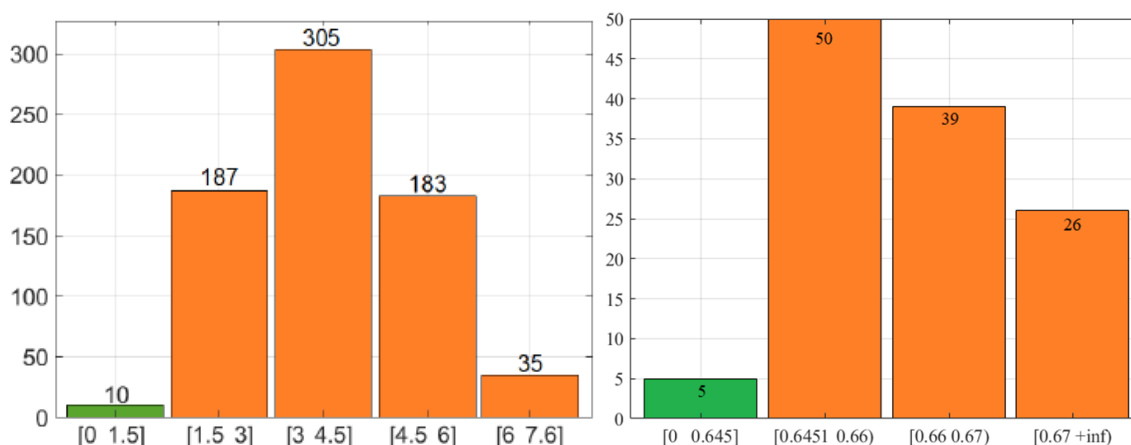


Рисунок 3 – Распределение возможных порядков установки по получаемым максимальным значениям зазоров (слева – соединение двух панелей фюзеляжа, справа – сборка пилона)

Для демонстрации геодезического алгоритма и метода порядка как комплексного подхода к оптимизации сборочного процесса рассматривается комплексная задача, которая зачастую появляется на сборочных линиях – определения наилучшего расположения крепежных элементов и порядка их установки на примере соединения двух панелей фюзеляжа для 10 различных начальных зазоров. Вычисленный порядок установки сравнивается с тремя основными существующими стратегиями выбора порядка установки крепежных элементов – слева направо, справа налево и от центра к краям.

Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 3. Они показывают, что предложенный метод порядка позволяет свести зазор до меньшего значения в большинстве случаев, либо позволяет получить зазор,

который отклоняется от лучшего не более, чем на ~3% (0.002 мм), что можно считать пренебрежимо малой величиной при условии технологических требований к зазору (свести зазор до 0.1-0.3 мм). Выбирая одну из классических стратегий, даже на примере из 10 рассмотренных начальных зазоров легко получить ситуацию, когда одна из них позволяет свести начальный зазор до несущественно меньшего значения (~3%) по сравнению с методом порядка, но до существенного большего на другом (~290%). Метод порядка оказывается устойчивее к вариациям форм начального зазора.

Таблица 3 – результирующие зазоры для различных начальных зазоров и найденных расстановок, и порядков их установки

№ зазора	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рез. зазор										
Метод порядка, мм	0.097	0.061	0.104	0.051	0.059	0.044	0.097	0.028	0.113	0.038
Справа, мм	0.091	0.246	0.369	0.045	0.100	0.046	0.096	0.029	0.147	0.094
Слева, мм	0.159	0.235	0.433	0.044	0.203	0.044	0.114	0.028	0.090	0.070
От центра, мм	0.096	0.063	0.098	0.044	0.059	0.045	0.097	0.028	0.090	0.043

Пятая глава посвящена описанию интеграции разработанных методов в программный комплекс ASRP (Assembly Simulation of Riveting Process). Данный программный комплекс предназначен для моделирования сборки посредством клепочного и болтового соединения. Геодезический алгоритм и метод порядка составили вычислительное ядро оптимизационной функциональности комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование, проведенное в рамках данной работы, посвящено разработке безытерационных методов определения положения и порядка установки крепежных элементов при временной сборке авиационных конструкций. Решаемые задачи лежат на стыке таких областей знаний как механика, комбинаторика и оптимизация. Комплексная природа задачи делает затруднительным или неэффективным ее решение методом, относящимся только к одной из областей, что было наглядно продемонстрировано на примерах, рассмотренных в главе 2. Анализ существующего методологического аппарата показал отсутствие единого подхода к постановке и формализации подобного рода задач. Поэтому такие формулировки были предложены в данной работе.

Методы решения поставленных задач, предложенные в работе, позволяют на порядки сократить время вычислений без потери точности. Значительная часть работы посвящена вычислительному эксперименту и анализу эффективности предложенных методов. Предложенные методы

построены таким образом, что для их работы и получения результатов требуется провести столько вычислений функции цели, сколько начальных используется данных, без каких-либо дополнительных итераций.

Все сформулированные во введении задачи исследования решены. Перечислим основные результаты, полученные в работе:

- в работе впервые сформулированы постановки задач оптимизации числа, расположения и порядка установки крепежных элементов при сборке авиационных конструкций;
- разработан новый эффективный метод выбора числа и расположения временных крепежных элементов при математическом моделировании временной сборки авиационных конструкций, основанный на совместном использовании информации о механических свойствах и геометрии соединения;
- разработан новый эффективный метод определения порядка установки крепежных элементов, основанный на механических свойствах соединения и особенностях процесса сборки авиационных конструкций;
- разработанные методы верифицированы на модельных задачах;
- исследована эффективность разработанных методов по сравнению со стандартными методами при решении тестовых и практических задач сборки.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, в том числе рецензируемых SCOPUS и Web of Science:

1. Lupuleac S. Software Complex for Simulation of Riveting Process: Concept and Applications / S. Lupuleac, M. Petukhova, J. Shinder, A. Smirnov, M. Stefanova, N. Zaitseva, **T. Pogarskaia**, E. Bonhomme // SAE Technical Papers – 2016. – V. 2016- Octob – № October. [SCOPUS]
2. Zaitseva, N. High Performance Computing for Aircraft Assembly Optimization / N. Zaitseva, S. Lupuleac, M. Petukhova, M. Churilova, **T. Pogarskaia**, M. Stefanova // Proceedings - 2018 GlobalSmart Industry Conference. – 2018. – P. 1-6. [Web of Science]
3. **Pogarskaia T.** Simulation and optimization of aircraft assembly process using supercomputer technologies / T. Pogarskaia, M. Churilova, M. Petukhova, E. Petukhov // Communications in Computer and Information Science – 2019. – V. 965. [SCOPUS]
4. Zaitseva, N. Simulation of Aircraft Assembly via ASRP Software / N. Zaitseva, **T. Pogarskaia**, O.Minevich, J. Shinder, E. Bonhomme // SAE Technical Papers. – 2019. – P. 2019-01-1887. [SCOPUS]
5. Popov N.P. Geodesic distance numerical computation on compliant mechanical parts in the aircraft industry / Popov N.P., **Pogarskaia T.A.** // Journal of Physics: Conference Series – 2019. – T. 1326 – № 1 – C.012026. [SCOPUS]

6. Lupuleac S. Optimization of fastener pattern in airframe assembly / Lupuleac S., **Pogarskaia T.**, Churilova M., Kokkolaras M., Bonhomme E. // *Assembly Automation* – 2020. – V. 40 – № 5. [Web of Science]
7. **Pogarskaia T.** Novel approach to optimization of fastener pattern for airframe assembly process / Pogarskaia T., Lupuleac S., Bonhomme E. // *Procedia CIRP* – 2020. – V. 93 – С.1151–1157. [SCOPUS]
8. **Pogarskaia T.** Application of a Novel Approach Based on Geodesic Distance and Pressure Distribution to Optimization of Automated Airframe Assembly Process / T. Pogarskaia, M. Churilova, E. Bonhomme // *Communications in Computer and Information Science* – 2020. – V. 1331 – С.162–173. [SCOPUS]
9. **Погарская Т.А.**, Оптимизация расстановки крепежных элементов при сборке самолетов на основе метода прямого поиска на адаптивных сетках // *Труды МАИ* – Т. 110 – 2020.

Публикации в других изданиях:

10. Зайцева Н.И. Методология автоматической расстановки фиксирующих элементов для соединения частей крыла / Н.И. Зайцева, Т.А. Погарская, С.В. Березин, С.В. Лупуляк// В сборнике: Неделя науки СПбПУ.– СПб.: Изд-во Политехнического ун-та. – 2015. – С. 39-41.
11. Попов Н.П. Алгоритмы вычисления геодезического расстояния на основе теории графов / Н.П. Попов, **Т.А. Погарская** // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та., 2018. С.244-247.