ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Зайцева Надежда Игоревна

Математическое моделирование отклонений поверхностей деталей и анализ качества сборки в авиастроении

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: **Бухановский Александр Валерьевич,**
доктор технических наук, директор мегафакультета трансляционных информационных технологий, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург

Федоров Александр Евгеньевич,
кандидат технических наук, инженер-программист, общество с ограниченной ответственностью «ДизайнСофт», г. Санкт-Петербург

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 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «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 темы

При создании технологии сборки для промышленного производства нужно учитывать, что детали, поступающие на сборочную линию, имеют случайные отклонения от номинальной формы. Эти отклонения возникают из-за неизбежной вариативности процессов массового производства. При сборке таких неидеальных деталей эти случайные отклонения в формах и размерах влияют на качество соединения. Соответственно, в процессе математического моделирования и анализа процесса сборки нужно иметь возможность учитывать и предсказывать влияние случайных отклонений на результат сборочного процесса.

Моделирование сборочного процесса с учетом случайных отклонений особенно актуально при разработке и оптимизации процессов серийной сборки, когда анализируемый сборочный процесс должен с достаточной надежностью работать для всех деталей, поступающих на сборочную линию, независимо от присутствующих в них случайных отклонений. Подобные задачи часто возникают в таких областях машиностроения, как авиастроение и автомобилестроение, поскольку высокая конкуренция в этих областях заставляет производителей постоянно искать новые более эффективные сборочные технологии.

Диссертационная работа посвящена усовершенствованию методов численного анализа сборочных процессов, поскольку для проведения анализа процесса сборки деталей в авиастроении важно учитывать ряд характерных особенностей этой области.

Во-первых, большинство конструкций, собираемых в авиастроении, являются крупногабаритными и гибкими, поэтому при моделировании процесса их сборки нужно учитывать деформацию и контактное взаимодействие между деталями. При этом большая часть разработанных методов анализа сборки применимы только при условии, что детали считаются абсолютно твердыми телами.

Во-вторых, собираемые детали являются сложными конструкциями, и на их отклонения от номинальной формы и номинального расположения влияет множество случайных факторов. Соответственно, возможные случайные отклонения соединяемых поверхностей в большинстве случаев можно предсказать только на основе анализа измерений, проведенных для ранее собранных деталей. Кроме того, для задач авиастроения характерно то, что набор измерений форм деталей, доступный для анализа, может содержать малое число измерений. Все это требует построения специальной математической модели случайных отклонений, применимой в случае ограниченного набора данных.

В-третьих, основным критерием качества сборки в авиастроении является зазор, остающийся между деталями после их соединения. При этом зазор нужно рассматривать не точечно, а как непрерывное поле в зоне соединения деталей. Существующие методы не дают возможности провести настолько подробный анализ зазора.

Подобными особенностями обладает и ряд задач в других машиностроительных областях. Однако методы анализа сборки с учетом отклонений, разработанные ранее, не учитывают все эти особенности и не позволяют получить результат анализа с требуемой точностью.

Соответственно, для проведения анализа сборочного процесса с учетом вариаций формы собираемых деталей и особенностей авиастроительной области требуется разработать специальный математический аппарат, включающий в себя метод моделирования отклонений и метод анализа сборки, которые учитывают вышеперечисленные особенностей.

Цель и задачи исследования

Цель данной работы – это разработка комплексного подхода к математическому моделированию случайных отклонений формы поверхностей деталей и анализу процесса сборки с учетом этих отклонений для повышения качества сборки авиационных конструкций.

Для достижения этой цели в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать метод анализа процесса сборки авиационных конструкций и создать набор статистических критериев для оценки качества сборочного процесса.
2. Разработать метод учета сборочных отклонений для сложных деталей. Метод должен быть пригоден для моделирования отклонений в случае ограниченного набора измерений.
3. Разработать метод моделирования начального зазора на основе случайного поля. Построить оценки параметров модели по малому набору измерений и определить способ получения новых реализаций начального зазора.
4. Разработать метод моделирования начального зазора на основе собственных форм свободных колебаний собираемых деталей. Предложить методы оценки и подбора оптимальных параметров построенной модели. Получить процедуру генерации новых реализаций зазора.
5. Исследовать применимость построенных моделей начального зазора в случае малого набора измерений. Выбрать критерии для сравнения генерируемых и измеренных зазоров. Выявить наиболее эффективный

метод моделирования начального зазора в ситуации ограниченного количества измерений.

6. Внедрить разработанный комплексный подход к моделированию отклонений и анализу сборки в специализированный программный комплекс для моделирования процесса сборки деформируемых конструкций.

Объекты (предмет) и методы исследований

Объектом исследования является сборка авиационных конструкций.

Предметом исследования являются методы анализа сборочных процессов с учетом возможного присутствия случайных сборочных отклонений, позволяющие с помощью численного моделирования предсказать и проанализировать качество сборки. Также предметом исследования являются методы моделирования случайных отклонений, позволяющие получать реализации отклонений в случае ограниченности доступного набора измерений.

Для решения поставленных задач в диссертационной работе использовались методы математического моделирования, теории вероятностей, математической статистики и вычислительной механики. Для внедрения разработанного подхода к анализу сборки был использован язык программировании C++.

Научная новизна результатов:

1. Разработаны новые методы моделирования начального зазора на основе случайного поля и на основе собственных форм свободных колебаний деталей, позволяющие учесть отклонения собираемых деталей.
2. Произведено исследование применимости моделей начального зазора в случае ограниченного набора измерений, и определен наиболее эффективный метод моделирования начального зазора для использования в анализе сборки.
3. Разработан новый метод анализа сборочного процесса с учетом особенностей сборки крупногабаритных деталей в авиастроении.
4. Предложены специальные статистические критерии, позволяющие оценить качество сборки авиационных конструкций на основе анализа поля зазора между деталями.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическую значимость работы составляют: разработанные методы моделирования начального зазора; построенные оценки параметров модели начального зазора на основе случайного поля; разработанные оценки параметров и метод подбора оптимального количества используемых собственных форм для

модели начального зазора на основе собственных форм свободных колебаний деталей.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования предложенного подхода для анализа и оптимизации реальных сборочных процессов в авиастроении. Разработанный комплексный подход был внедрен в программный комплекс ASRP (Assembly Simulation of Riveting Process) как отдельная функциональность для анализа качества сборочного процесса.

Работа над диссертацией велась в 2016-2020 гг. в рамках совместных проектов СПбПУ и компании AIRBUS. Разработанный подход был применен для решения ряда практических задач, связанных с разработкой и оптимизацией реальных сборочных процессов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод моделирования начального зазора на основе случайного поля и численные оценки параметров этой модели по набору измерений начального зазора.
2. Метод моделирования начального зазора на основе собственных форм собираемых деталей, процедуры для подбора оптимального числа используемых собственных форм и для численной оценки коэффициентов для этой модели.
3. Метод анализа процесса сборки авиационных конструкций и набор специальных критериев, позволяющих оценить и проанализировать качество соединения деталей.
4. Функциональные программные модули для проведения анализа сборки по разработанному методу.

Степень достоверности результатов

Достоверность разработанных моделей начального зазора подтверждается сравнением зазоров, получаемых в процессе моделирования, с измеренными зазорами. Достоверность результатов применения разработанного метода анализа сборки подтверждается результатами технологических проверок и экспериментов, проведенных на производстве.

Апробация результатов исследования

Основные результаты работы докладывались на:

- на международной конференции «ASME IMECE 2020 International Mechanical Engineering Congress & Exposition» (США, 2020);

- на международной конференции «SAE Aerotech Europe 2019» (Бордо, Франция, 2019);
- на российской конференции «Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития 2018» (Челябинск, Россия, 2018);
- на российской конференции «Национальный Суперкомпьютерный Форум (НСКФ-2017)» (Переславль-Залесский, Россия, 2017);
- на международной конференции «The 19th European Conference on Mathematics for Industry» (Сантьяго-де-Компостела, Испания, 2016);
- на российской конференции «XLI Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, Россия, 2016);
- на семинарах НИЛ «Виртуально-имитационного моделирования», 2016-2020 (Санкт-Петербург, Россия);
- на рабочих встречах с компанией AIRBUS 2016-2020 (Тулуза, Франция).

Публикации

Результаты диссертационной работы отражены в 11 публикациях, в том числе в 9 публикациях в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК РФ, в том числе индексируемых SCOPUS или Web of Science.

Структура и объем диссертации

Работа включает в себя введение, шесть глав и заключение. Объем диссертации – 105 страниц, на которых расположены 44 рисунка. Список литературы содержит 80 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится описание особенностей задачи анализа сборки авиационных конструкций, обоснована актуальность тематики исследований, сформулирована цель работы и изложено краткое описание содержания диссертации.

В **первой главе** проведен обзор методов моделирования и анализа сборки. Описан наиболее общий подход к анализу сборочных процессов с учетом отклонений, основанный на статистическом моделировании по методу Монте-Карло[1]. Идея такого подхода – это моделирование как можно большего количества ситуаций, которые могут реализоваться на практике из-за присутствия случайных

[1] Early R., Thompson J., “Tolerance Analysis Using Monte Carlo Simulation”, 1989.

отклонений. Дальнейшее развитие методов анализа сборки с учетом отклонений связано с различными модификациями такого стандартного подхода. Однако разработанные к настоящему времени методы не позволяют провести анализ сборки авиационных конструкций с достаточной точностью. В частности, можно выделить метод потока отклонений[2], используемый для анализа сборки абсолютно твердых деталей и не учитывающий гибкость конструкций; прямой метод Монте-Карло[3] и метод коэффициентов влияния[4], позволяющие учесть деформации и контактное взаимодействие деталей, но снижающие точность моделирования.

В работе предлагается новая модификация стандартного подхода, которая позволяет получить более эффективный инструмент для анализа качества сборки именно для авиационных конструкций. Предложенный подход основан на моделировании сборочного процесса через решение редуцированной контактной задачи в вариационной постановке[5]. Контактная задача, описывающая процесс соединения крупногабаритных криволинейных деталей с помощью установки крепежных элементов (например, болтов или заклепок) после дискретизации может быть сформулирована как задача минимизации квадратичного функционала для поиска перемещений деталей в зоне возможного контакта (зоне стыка):

$$\frac{1}{2}u^T K u - f^T u \to \min$$
$$\text{при условии: } G - A^T u \geq 0 \qquad (1)$$

где u – искомый вектор нормальных перемещений деталей в зоне стыка, K – редуцированная матрица жесткости, f – вектор сил, приложенных от крепежных элементов, A – матрица ограничений, задающая пары контактных узлов, а G – вектор значений *начального зазора* между деталями в расчетных узлах зоны стыка. Допустимое множество перемещений определяется условием непроникновения деталей. После решения этой задачи *конечный зазор*, остающийся между деталями после их соединения, вычисляется как $g = G - A^T u$.

В такой постановке начальный зазор задает взаимное расположение деталей без учета их контактного взаимодействия. В работе вводится следующее определение: начальный зазор — это скалярная функция $G(x, y)$, где (x, y) – локальные координаты в зоне стыка $\Omega \subset \mathbb{R}^2$; модуль этой функции характеризует расстояние между соединяемыми деталями в нормальном направлении к зоне стыка без учета контактного взаимодействия деталей; а знак характеризует

[2] Huang W. et al. “Stream-of-variation (SOVA) modeling II: a generic 3D variation model for rigid body assembly in multistation assembly processes”, 2007.

[3] Gao J. et al. “Comparison of Assembly Tolerance Analysis by the Direct Linearization and Modified Monte Carlo Simulation Methods”, 1995.

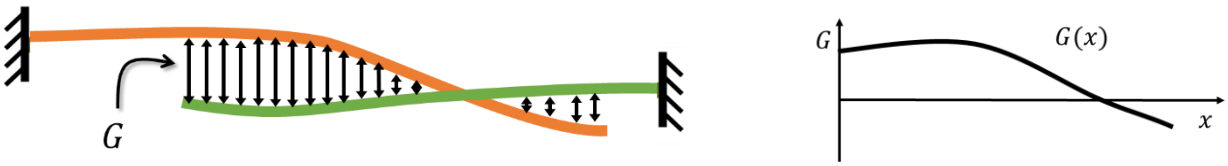
[4] Liu, S., Hu, S. “Variation simulation for deformable sheet metal assemblies using finite element methods”, 1997.

[5] Lupuleac, S., Zaitseva, N. et al. “Simulation and optimization of airframe assembly process”, 2018.

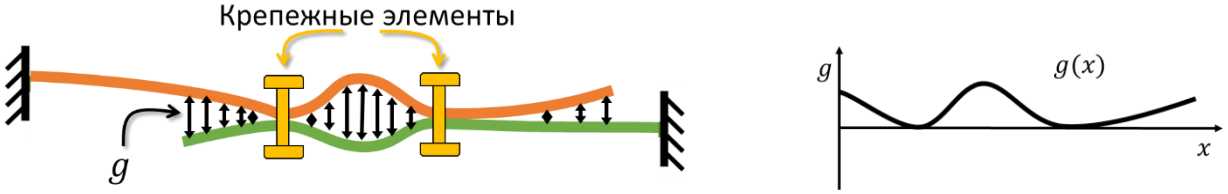
взаимное расположение деталей. На практике начальный зазор возникает из-за случайных отклонений поверхностей соединяемых деталей. Поскольку детали могут отклоняться от номинального положения в любую сторону, вполне возможна ситуация, когда из-за получившихся изгибов без учета контактного взаимодействия детали должны были бы проникнуть друг в друга (см. пример на Рисунке 1а). Там, где детали не касаются друг друга, начальный зазор считается положительным; а там, где детали отклоняются так, что стремятся проникнуть друг в друга, он считается отрицательным.

Заданное таким образом значение начального зазора однозначно определяет перемещения деталей в процессе их сборки, и, соответственно, значение конечного зазора $g(x, y)$, описывающего расстояние между деталями после сборки (см. Рисунок 1б). Именно возможное распределение значений конечного зазора во всех точках зоны стыка Ω является основой для оценки качества соединения. Согласно требованиям сборочных технологий, для обеспечения качества собранной конструкции конечный зазор между деталями должен находиться в определенных пределах.

Таким образом, через начальный зазор в работе предлагается учитывать влияние случайных сборочных отклонений на процесс сборки, а через полученные значения конечного зазора – определять качество соединения.



(а) Начальный зазор



(б) Конечный зазор

Рисунок 1 – Начальный и конечный зазор между деталями в одномерном случае

Поскольку начальный зазор имеет случайный характер, статистический анализ сборки по методу Монте-Карло в этом случае может быть основан на решении большого числа контактных задач для разных реализаций случайного начального зазора. Для проведения такого анализа, соответственно, требуется достаточно большой набор реализаций начального зазора. Однако получение такого набора зачастую затруднено тем, что в большинстве случаев для

авиационных конструкций доступно только небольшое количество измерений начального зазора между реальными деталями. Поэтому для построения универсальной процедуры анализа сборки в работе предлагается использовать стохастическую модель начального зазора. Построение такой модели позволит получать сколь угодно большое число реализаций начального зазора. Основные методы моделирования отклонений, описанные в литературе, направлены на моделирование вариаций формы отдельных деталей. По этой причине для начального зазора как комбинации этих отклонений потребовалась разработка новых методов моделирования.

Во **второй главе** описан первый предлагаемый метод моделирования начального зазора. Этот метод основан на том, что начальный зазор можно представить через некоторое случайное поле как сумму случайных отклонений поверхностей соединяемых деталей. Модель начального зазора, предложенная в работе, имеет вид:

$$G_{RF}(x, y) = \mu(x, y) + \xi(x, y), \quad (2)$$

где $\mu(x, y)$ – детерминированная вещественная функция, которая моделирует регулярную компоненту зазора, а $\xi(x, y)$ – случайное поле, то есть скалярная случайная функция, зависящая от вещественных координат $(x, y) \in \Omega$ и передающая случайную компоненту зазора.

Регулярная компонента $\mu(x, y)$ считается непрерывно дифференцируемой функцией в зоне стыка, и для нее в работе предлагается метод оценки через среднее значение зазора в точках измерения. Случайное поле $\xi(x, y)$ предполагается гладким, гауссовым, однородным и анизотропным полем с нулевым средним значением, дисперсией σ^2 и экспоненциальной корреляционной функцией вида:

$$K(\vec{r}; \alpha, \beta) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{\alpha^2 r_x^2}{2} - \frac{\beta^2 r_y^2}{2}\right), \quad (3)$$

где $\vec{r} = [|x_2 - x_1|, |y_2 - y_1|]^T$ – расстояние между парой точек зоны стыка $(x_1, y_1) \in \mathbb{R}^2$ и $(x_2, y_2) \in \mathbb{R}^2$, а пара численных параметров $(\alpha, \beta) \in \mathbb{R}^2$ определяет корреляционные свойства случайного поля в направлении осей X и Y соответственно. Для параметров σ^2, α и β в работе предложены оценки на основе метода максимального правдоподобия и метода наименьших квадратов с привлечением специальных оценок из теории малых выборок. После оценки параметров численные реализации начального зазора для предложенной модели можно получить, суммируя значение $\mu(x, y)$ с реализациями случайного поля $\xi(x, y)$.

В **третьей главе** описывается второй разработанный метод моделирования начального зазора, основанный на разложении начального зазора в ряд по некоторому набору функций. В качестве такого набора функций предлагается

использовать набор ортонормированных функций $\{e_1(x,y), e_2(x,y), \dots\}, (x,y) \in \Omega$, для построения которых собственные формы свободных колебаний деталей ортонормируются в пространстве $L_2(\Omega)$ с помощью алгоритма Грамма-Шмидта.

Предлагаемая модель начального зазора представляет собой частичную сумму ряда Фурье вида:

$$G_{MD}(x,y) = \sum_{k=1}^{K} \lambda_k e_k(x,y)\,, \tag{4}$$

где K – это число используемых ортонормированных функций, а коэффициенты $\lambda_k, k = 1, \dots, K$ формируют случайный вектор $\vec{\lambda} \in \mathbb{R}^K$. Предполагается, что вектор $\vec{\lambda}$ имеет нормальное распределение с математическим ожиданием $\vec{m} \in \mathbb{R}^K$ и корреляционной матрицей $\mathcal{K} \in \mathbb{R}^{K\times K}$. Для оценки $\vec{m}$ и $\mathcal{K}$ предлагается использовать выборку значений коэффициентов, полученных при разложении измеренных начальных зазоров в ряд (4).

Для выбора оптимального числа функций K в работе предложена специальная процедура на основе сравнения полных вариаций начального зазора. Полная вариация, служащая мерой сложности формы графика функции начального зазора $G(x,y) \in C^1(\Omega)$, определяется как:

$$V(G) = \iint_{\Omega} |\nabla G| dxdy\,. \tag{5}$$

Набор функций $\{e_1(x,y), e_2(x,y), \dots\}$ обладает тем свойством, что с увеличением номера k сложность формы графиков этих функций повышается (см. пример на Рисунке 2). По построению, размах значений сгенерированных зазоров близок к размаху измеренных зазоров. При увеличении числа используемых ортонормированных функций K полная вариация зазоров, получаемых по модели (4), начинает превышать полную вариацию измеренных зазоров. Для каждого K можно сравнить среднее значение полной вариации V_{meas} для измеренных и V_{gen} для сгенерированных зазоров. В качестве оптимального числа используемых функций выбирается то, которое дает минимальную разность между этими средними значениями:

$$K_{opt} = \underset{K=1,2,\dots}{\arg\min}\, d(K), \qquad d(K) = \left| \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} V_{meas}^{(i)} - \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} V_{gen}^{(i)} \right|, \tag{6}$$

где M – число измеренных зазоров.

После подбора оптимального числа K_{opt} и оценки параметров вектора $\vec{\lambda}$ можно получать новые реализации начального зазора по формуле (4), генерируя случайные значения нормального вектора $\vec{\lambda}$.

В **четвертой главе** приведено детальное описание предлагаемого метода анализа сборки авиационных конструкций на основе статистического моделирования. Разработанный метод состоит из трех этапов:

Этап 1. Генерация начальных зазоров. На этом этапе генерируется набор из большого числа начальных зазоров. Генерация реализаций производится на основе моделирования начального зазора.

Этап 2. Моделирование сборочного процесса. На этом этапе для каждого начального зазора производится моделирование контактного взаимодействия деталей: с помощью решения контактной задачи рассчитываются перемещения деталей и, соответственно, определяются значения конечного зазора между деталями.

Этап 3. Статистическая оценка качества сборки. По полученному набору значений конечных зазоров оцениваются вероятностные характеристики этого зазора.

Для статистической оценки качества сборки в работе введены два типа критериев. Первый критерий – это *статистическая кривая*, оценивающая вероятность того, что значение конечного зазора после сборки не превысит величины $e \in \mathbb{R}$:

$$P(e) = \mathrm{Prob}\{g(x,y) \le e, \forall (x,y) \in \Omega\}. \quad (7)$$

Численно эта кривая определяется как эмпирическая функция распределения, построенная по выборке из всех полученных значений конечного зазора.

Второй критерий оценки качества – это *локальная статистика,* оценивающая вероятность того, что значение конечного зазора в конкретной точке (x, y) зоны стыка Ω превысит заданный допуск $E \in \mathbb{R}$:

$$P_{loc}(x,y;E) = \mathrm{Prob}\{g(x,y) > E\}. \quad (8)$$

Численно эта статистика вычисляется по выборке из значений конечного зазора в каждом конкретном расчётном узле зоны стыка. Два типа предложенных вероятностных критерия оценки качества сборки предоставляют наглядный набор инструментов для инженерного анализа качества сборки авиационных конструкций.

На Рисунке 3 показан пример анализа, проведенного по предложенному методу. Для начальных и конечных зазоров приведено по четыре конкретных примера, и показана статистическая кривая, полученная в результате анализа на основе большого набора начальных зазоров. По значениям статистической кривой можно оценить общее качество соединения деталей относительно любого заданного предельного значения зазора. Полученная локальная статистика для значения E = 0.1 мм приведена на Рисунке 4. Анализ локальной статистики

позволяет выделить проблемные области в зоне стыка, где вероятность того, что конечный зазор превысит заданное E, достаточно велика.

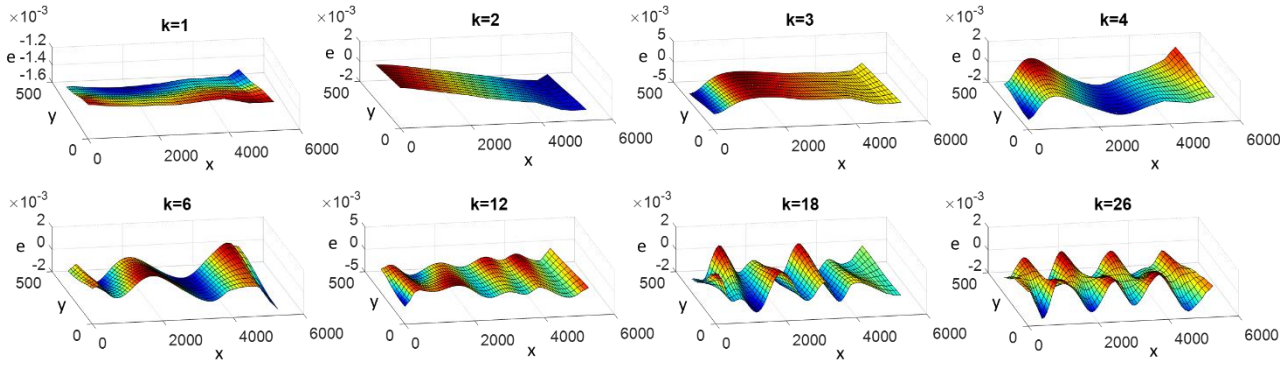


Рисунок 2 – Примеры полученных ортонормированных функций $e_k(x, y)$

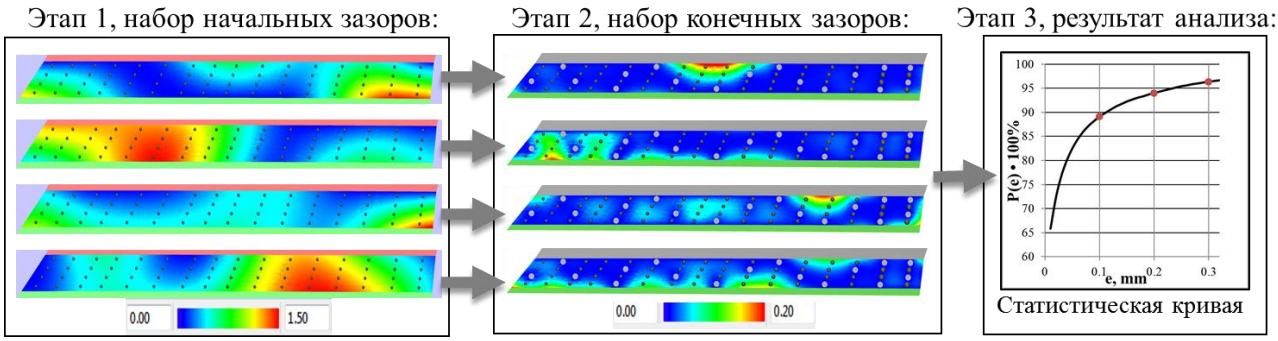


Рисунок 3 – Проведенный анализ качества сборки

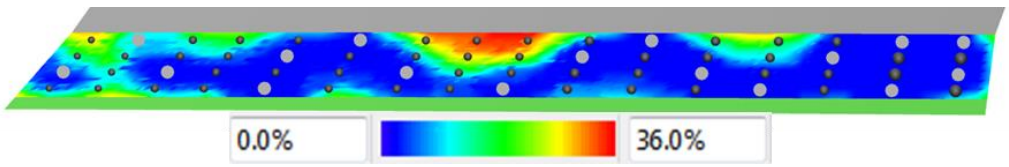


Рисунок 4 – Полученная локальная статистика (вероятность того, что конечный зазор превысит $E = 0.1$ мм); тёмно-серые точки обозначают пустые отверстия, светло-серые – установленные крепежные элементы

В **пятой главе** проведено сравнительное исследование предлагаемых методов моделирования начального зазора для оценки того, как количество доступных измерений влияет на применение этих моделей в качестве источника реализаций начальных зазоров. Исследование проводилось на специальном тестовом примере – на примере анализа процесса соединения крыла и фюзеляжа самолета. Для этого примера набор доступных измерений содержит 300 измеренных начальных зазоров, что позволяет провести процедуру кросс-валидации результатов моделирования.

Для проведения кросс-валидации набор измерений случайным образом делится на «контрольный» и «тестовый» наборы. Для того, чтобы сымитировать

ситуацию ограниченности набора исходных данных, из тестового набора создаются тренировочные выборки меньшего объема, используемые для оценки параметров моделей.

Для валидации методов моделирования начального зазора проведено сравнение вероятностных характеристик измеренных зазоров и зазоров, сгенерированных по первой (2) и по второй (4) модели начального зазора. В качестве характеристики начального зазора используется функция распределения величины начального зазора: $F_G(x) = \mathrm{Prob}\{G \le x\}$.

Соответственно, точность моделирования оценивается через относительное интегральное среднеквадратическое отклонение:

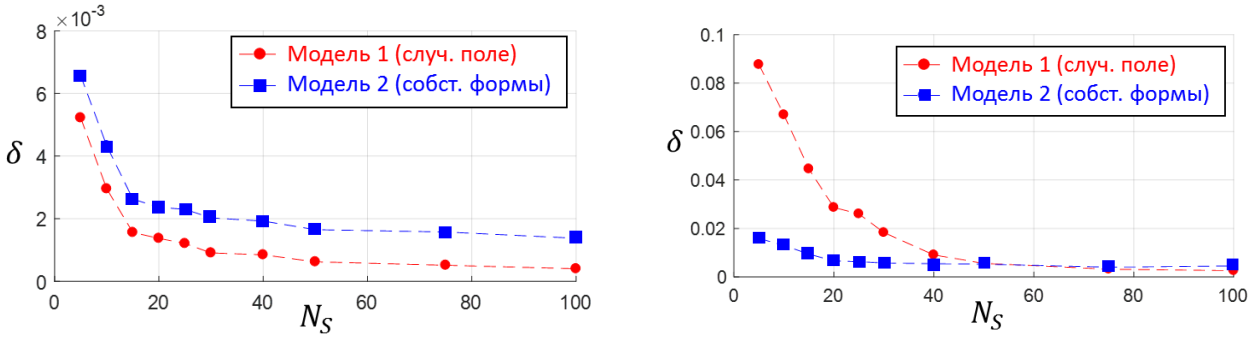
$$\delta\left(F_G, \hat{F}_G\right) = \left(\frac{\mathbb{E} \int_{\mathbb{R}} \left| F_G(x) - \hat{F}_G(x) \right|^2 dx}{\int_{\mathbb{R}} |F(x)|^2 dx} \right)^{1/2} . \quad (9)$$

В качестве точного значения берется F_G для контрольного набора зазоров, а в качестве оценок $\hat{F}_G$ – функции распределения, построенные для начальных зазоров, сгенерированных по моделям (2) и (4) на основе тренировочных выборок. Здесь $\mathbb{E}$ – это операция взятия математического ожидания, которая на практике заменяется осреднением по большому набору тренировочных выборок. На Рисунке 5а представлены вычисленные погрешности $\delta\left(F_G, \hat{F}_G\right)$ в зависимости от размера тренировочной выборки N_S. Видно, что первая модель точнее передает распределения начального зазора, чем вторая модель.

Величина конечного зазора является очень чувствительной к сложности формы графика начального зазора. Чем больше вариация начального зазора, тем труднее уменьшить конечный зазор при соединении деталей. В силу этого, кроме величины начального зазора важно также сравнить распределение значений полных вариаций начального зазора. Для этого, аналогично формуле (9), вычисляется $\delta\left(F_V, \hat{F}_V\right)$ – оценка точности моделирования распределения значений полной вариации $F_V(v), v \in \mathbb{R}$. Полученные погрешности $\delta\left(F_V, \hat{F}_V\right)$ представлены на Рисунке 5б. Результаты показывают, что вторая модель начального зазора на основе форм собственных колебаний деталей значительно лучше передает значения полной вариации зазора для малых наборов исходных данных, чем модель на основе случайного поля.

В этой главе также описано поведение оценок параметров моделей начального зазора для малых наборов измерений. Результаты показали, что точность оценок для обоих моделей довольно быстро повышается с увеличением размера тренировочной выборки N_S, по которой строится оценка параметров.

Далее в работе проведено исследование того, как использование моделей начального зазора влияет на полученные в результате анализа статистические оценки качества сборки. Степень эффективности использования сгенерированных зазоров для анализа сборочного процесса определялась через погрешность полученных статистических кривых.



(а) $\delta\left(F_G, \hat{F}_G\right)$ (б) $\delta\left(F_V, \hat{F}_V\right)$

Рисунок 5 – Погрешность моделирования для разных N_S

Точным значением статистической кривой $P(e), e \in \mathbb{Z}$ считалось значение, полученное из анализа сборки, проведенного для измеренных начальных зазоров из контрольного набора. Погрешность приближения для этой статистической кривой оценивалась как:

$$\delta\left(P, \hat{P}\right) = \left(\frac{\mathbb{E} \int_{\mathbb{R}} \left(P(e) - \hat{P}(e)\right)^2 de}{\int_{\mathbb{R}} P^2(e) de} \right)^{1/2}, \tag{10}$$

где в качестве оценки статистической кривой $\hat{P}(e)$ использовались кривые, полученные в результате анализа качества сборки на основе начальных зазоров из моделей перовой и второй модели. На Рисунке 6 приведен график полученных значений погрешности $\delta\left(P, \hat{P}\right)$ для моделей (2) и (4) в зависимости от числа измерений N_s, доступных для построения моделей.

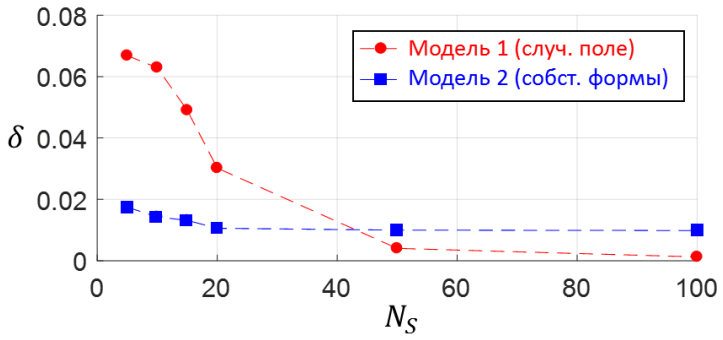


Рисунок 6 – Погрешность $\delta\left(P, \hat{P}\right)$ в зависимости от размера тренировочной выборки N_s

Сравнение полученных погрешностей показало, что для малого числа доступных измерений (обычно это случаи, когда $N_S \leq 10$) модель на основе собственных форм более точно передает значения статистической кривой, то есть является более подходящей для проведения анализа сборки.

В **шестой главе** описано несколько практических примеров использования разработанного метода анализа сборочного процесса. В качестве первого примера приводится анализ, проведенный для процесса сборки крыла самолета. Поставленная задача состояла в определении минимального числа крепежных элементов, установка которых позволит достичь заданного качества соединения деталей. В этой задаче для анализа не было доступно никаких измерений начального зазора, а экспериментальная выборка состояла из 8 измерений конечного зазора уже после сборки деталей. В таком случае для проведения анализа предлагается использовать метод моделирования начального зазора на основе случайного поля, поскольку в упрощенном виде эта модель может быть определена тремя численными параметрами: σ^2, α и β. Значения этих параметров могут быть подобраны из сравнения измеренных конечных зазоров и конечных зазоров, рассчитанных из решения контактных задач для начальных зазоров, сгенерированных по модели (2). Соответственно, после такого подбора параметров модель начального зазора с полученными параметрами использовалась как источник начальных зазоров для анализа сборочных процессов с разным числом крепежных элементов. В качестве оценки качества сборки для процесса с заданным число крепежных элементов в работе было предложено использовать значение статистической кривой $P(0.2)$, которое соответствует допуску 0.2 мм. Сравнение этих значений и требуемого качества соединения позволило определить минимальное число крепежных элементов, необходимое для достижения заданного уровня качества сборки крыла самолета.

Во втором примере описывается применение разработанных методов для анализа процесса установки усилительной накладки между обшивкой и каркасом фюзеляжа самолета. На этом сборочном этапе после установки накладки проводится автоматизированное сверление отверстий под финальные заклепки. Для предотвращения дефектов сверления важно, чтобы конечный зазор между деталями в точках сверления был мал. Конкретная задача состояла в сравнении исходного и модифицированного процесса установки накладки, отличающихся расположением и числом крепежных элементов. В такой ситуации в роли оценки качества сборочного процесса в работе предлагается использовать локальную статистику в точках сверления, полученную в результате проведенного статистического анализа. Сравнение полученных локальных статистик на практике

позволило проанализировать, насколько предлагаемая модификация процесса сборки сказывается на качестве процесса сверления в рассматриваемых точках.

В качестве третьего примера в работе описывается анализ процесса присоединения нижней панели крыла к фюзеляжу. В этом процессе соединяются четыре отдельные детали, и существует несколько зон стыка между этими деталями. В таком случае в работе предлагается моделировать начальный зазор в каждой зоне стыка, а затем, после проведения анализа сборки, сравнивать статистические кривые для каждой отдельной зоны стыка, что позволит определить качество соединения между каждой парой деталей.

В **заключении** приведены результаты и выводы, полученные в ходе выполнения настоящей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования был разработан комплексный подход к анализу качества сборки авиационных конструкций с учетом сборочных отклонений. Основой разработанного подхода являются использование моделей начального зазора для генерации необходимого числа реализаций сборочных отклонений и моделирование сборочного процесса на основе решения специального класса контактных задач.

В рамках диссертационного исследования автором получены следующие результаты:

1. Разработан метод анализа процесса сборки авиационных конструкций и набор статистических критериев для оценки качества соединения деталей.
2. Разработаны два метода моделирования начального зазора: на основе случайного поля и на основе собственных форм свободных колебаний собираемых деталей. Для каждого метода моделирования построены процедуры численной оценки параметров модели по доступному набору измерений.
3. Исследована применимость предложенных методов моделирования начального зазора в случае малого набора измерений. Определено, что более эффективным методом получения набора реализаций начального зазора для статистического анализа является моделирование начального зазора на основе собственных форм свободных колебаний деталей.
4. Проведено внедрение разработанного комплексного подхода анализа сборки в специализированный программный комплекс ASRP.
5. Предлагаемый подход к анализу качества сборки был применен для решения ряда практических задач, связанных с оптимизацией сборочных процессов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

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

1. Lupuleac, S., Petukhova, M., Shinder, J., Smirnov, A., Stefanova, M., **Zaitseva, N.**, Pogarskaia, T., Bonhomme, E. Software Complex for Simulation of Riveting Process: Concept and Applications // SAE Technical Papers. – 2016. – P. 2016-01-2090. **[Scopus, Q2]**
2. Lupuleac, S., **Zaitseva, N.**, Petukhova, M., Shinder, J., Berezin, S., Khashba, V., Bonhomme, E. Combination of Experimental and Computational Approaches to A320 Wing Assembly // SAE Technical Papers. – 2017. – P. 2017-01-2085. **[Scopus, Q2]**
3. **Zaitseva, N.**, Lupuleac, S., Petukhova, M., Churilova, M., Pogarskaia, T., Stefanova, M. High Performance Computing for Aircraft Assembly Optimization // Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference. – 2018. – P. 1-6. **[Scopus, Web of Science]**
4. Lupuleac, S., **Zaitseva, N.**, Stefanova, M., Berezin, S., Shinder, J., Petukhova, M., Bonhomme, E. Simulation and optimization of airframe assembly process // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – 2018. – Vol. 2A. **[Scopus, Web of Science]**
5. Lupuleac, S., Smirnov, A., Churilova, M., Shinder, J., **Zaitseva, N.**, Bonhomme, E. Simulation of body force impact on the assembly process of aircraft parts // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – 2019. – Vol. 2B. **[Scopus]**
6. Lupuleac, S., **Zaitseva, N.**, Stefanova, M., Berezin, S., Shinder, J., Petukhova, M., Bonhomme, E. Simulation of the Wing-to-Fuselage Assembly Process // Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME. – 2019. – Vol. 141, No. 6. – P. 0610091-0610099. **[Scopus, Web of Science, Q1]**
7. **Zaitseva**, **N.**, Pogarskaia, T., Minevich, O., Shinder, J., Bonhomme, E. Simulation of Aircraft Assembly via ASRP Software // SAE Technical Papers. – 2019. – P. 2019-01-1887. **[Scopus, Q2]**
8. Lupuleac, S., Shinder, J., Churilova, M., **Zaitseva**, N., Khashba, V., Bonhomme, E., Montero-Sanjuan, P. Optimization of Automated Airframe Assembly Process on Example of A350 S19 Splice Joint // SAE Technical Papers. – 2019. – P. 2019-01-1882. **[Scopus, Q2]**
9. **Zaitseva, N.**, Lupuleac, S., Khashba, V., Shinder, J., Bonhomme, E. Approaches to initial gap modeling in final aircraft assembly simulation // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – 2020. – Vol. 2B. – P. IMECE2020-23528. **[Scopus]**

Публикации в других изданиях:

10. **Zaitseva, N.**, Berezin, S. A Methodology for Fasteners Placement to Reduce Gap Between the Parts of a Wing. // В сборнике: Quintela P. et al. (eds) Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2016. Mathematics in Industry. – Vol. 26. – Springer, Cham. – P. 769-776.
11. **Зайцева, Н.И.**, Березин, С.В. Оценка параметров гауссовского случайного поля по выборке малого объема, наблюдаемой на дискретном множестве // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. Материалы научного форума с международным участием. Институт прикладной математики и механики. – 2016. – С. 233-236.