

Многокритериальная оптимизация расстановки крепежных элементов при сборке самолетов локальным полным перебором

Погарская Т.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

e-mail: Pogarskaya.t@gmail.com

Статья поступила 27.01.2019

Аннотация

Общая трудоемкость процесса сборки планера самолета, а также присутствие внушительной доли ручного труда делает весь процесс изготовления изделия многоступенчатым и времязатратным. Для ускорения производства требуется оптимизация его отдельных этапов. В данной работе приводится несколько различных постановок задач оптимизации схемы установки временных крепежных элементов, каждая из которых далее тестируется при оптимизации расположения крепежей на соединении двух частей фюзеляжа. Задачи решаются безградиентным методом, основанным на локальном полном переборе.

Ключевые слова: сборка самолета, оптимизация сборки, метод локальных вариаций, полный перебор, безградиентная оптимизация, контактная задача, крепежные элементы.

Введение

Современное авиастроение характеризуется сборкой крупномасштабных легко деформирующихся деталей небольшой жесткости, относительно низкими объемами

производства и высокой стоимостью конечного продукта. В то же время к собираемым компонентам предъявляются высокие требования по качеству с небольшими допусками на размеры [1-2]. Ввиду технологических особенностей производства, зачастую требуется установить лишь некоторую часть из всех возможных временных крепежей для дальнейших манипуляций, обеспечив при этом наиболее полный контакт деталей. Таким образом, сборка может занимать около 40% всего времени производства [3] из-за сверления тысяч отверстий и непрерывного контроля технологического процесса и качества сборки, выполняемых вручную. В то же время, практически все детали неизбежно подвергаются деформациям во время производственного процесса, транспортировки и позиционирования, из-за чего полный контакт во всей области соединения не может быть достигнут – всегда имеет место некоторый начальный зазор. Поэтому очень важно установить достаточное количество временных креплений на определенных этапах процесса. Установка и дальнейшее снятие крепежа – длительный процесс, обычно проводимый вручную. Количество крепежных элементов должно быть небольшим, но достаточным для минимизации зазоров между деталями. Попытка полностью свести начальный зазор может привести к установке чрезмерного количества фиксирующих крепежных элементов. С другой стороны, недостаточное количество крепежей может способствовать возникновению относительного смещения деталей и значительных зазоров. Поэтому необходим метод, позволяющий оптимизировать соединения деталей (будь то

фиксирующие элементы, заклепки, сварка и т.д.) за разумное время и без потери качества сборки и увеличения зазора между частями.

Задача оптимизации расстановки крепежных элементов рассматривалась ранее в некоторых работах и, ввиду ее комбинаторного характера, оптимизация производилась эвристическими методами. Например, в работе [4] оптимизация положения временного крепежа с заданными начальными зазорами между деталями была решена генетическим алгоритмом для соединения частей фюзеляжа с 248 отверстиями. В работе [5] авторы оптимизировали распределение сил в крепежных элементах для того, чтобы избежать сосредоточения напряжений в некоторых зонах при сборке за счет перераспределения сил из одних крепежных элементов на соседние. Подобные идеи использовались в [6], где позиции крепежных элементов не были определены заранее; вместо этого авторы рассматривали минимальное допустимое расстояние между соседними элементами.

В данной работе рассмотрены различные формулировки задачи оптимизации схемы установки временных крепежных элементов, проводится исследование влияния выбора функции цели на полученный результат, представлены результаты многокритериальной оптимизации методом локального полного перебора.

Постановка задачи

При оптимизации расстановки крепежей контактная задача [7-9] для поиска перемещений решается на каждом шаге оптимизационного алгоритма для определения зазора после изменения схемы расположения фиксирующих элементов.

Для решения этой задачи применяется методология, описанная в работах [9-11]. Требуется найти расстановку временных крепежных элементов, которая будет сводить начальный зазор между соединяемыми деталями так, чтобы максимальная величина результирующего зазора не превосходила некоторое заданное значение β . Постановка контактной задачи выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{2}u^T K_C u - F_C^T u \rightarrow \min \quad (1)$$

$$A^T u - g \leq \beta, \quad (2)$$

где F_C – вектор приложенных нормальных сил в зоне соединения деталей (от крепежных элементов); K_C – редуцированная матрица жесткости [10-11]; A – линейный оператор, определяющий нормальное направление к контактной поверхности; g – вектор начального зазора в зоне соединения деталей, представляющий собой начальное расстояние по нормали между узлами, которые могут прийти во взаимодействие; $u = \{u_i\}, i = 1, n_u$ – вектор нормальных перемещений; $A^T u - g = g_{res}$ – вектор результирующего зазора.

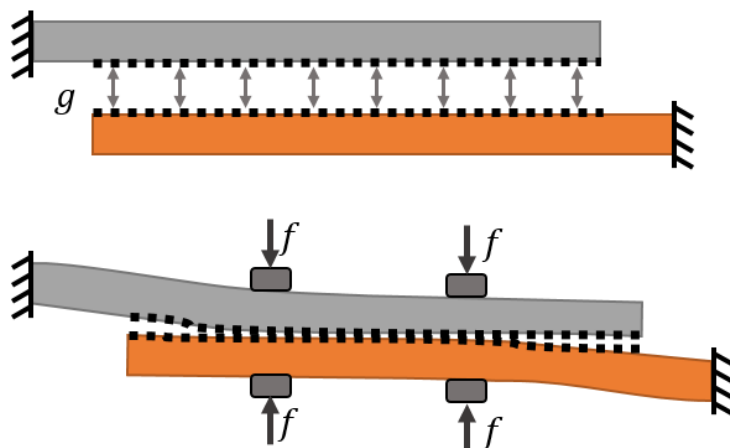


Рисунок 1 – схематическое изображение соединения: сверху – до установки крепежных элементов, снизу – после установки двух крепежных элементов (пунктирными линиями указаны границы зоны возможного контакта)

В зависимости от определения функции цели, задача оптимизации расстановки временных фиксирующих элементов может быть сформулирована по-разному. Рассмотрим некоторые из них.

Задача 1. Минимизация максимального зазора. Для заданного числа крепежных элементов n_0 определить их расположение H_*^0 в имеющихся отверстиях H так, чтобы оно обеспечивало минимальное значение максимального зазора g_{max} :

$$g_{max}(H_*^0) = \min_{\substack{H^0 = \{h_i^0\}_{i=1, n_f} \\ n_f = n_0}} \{g_{max}(H^0)\}, \quad (1)$$

где $H^0 = \{h_i^0\}_{i=1, n_f}$ – позиции отверстий в зоне соединения, где возможно установить крепежи; n_h – их общее число. Расположение крепежных элементов, установленных в отверстиях, описывается набором занятых отверстий $H^0 =$

$\{h_i^0\}_{i=1, n_f} \subset H$, где n_f – общее количество установленных крепежных элементов.

Каждый крепежный элемент моделируется парой сил с фиксированным значением, из которых затем формируется вектор F_c в задаче (2).

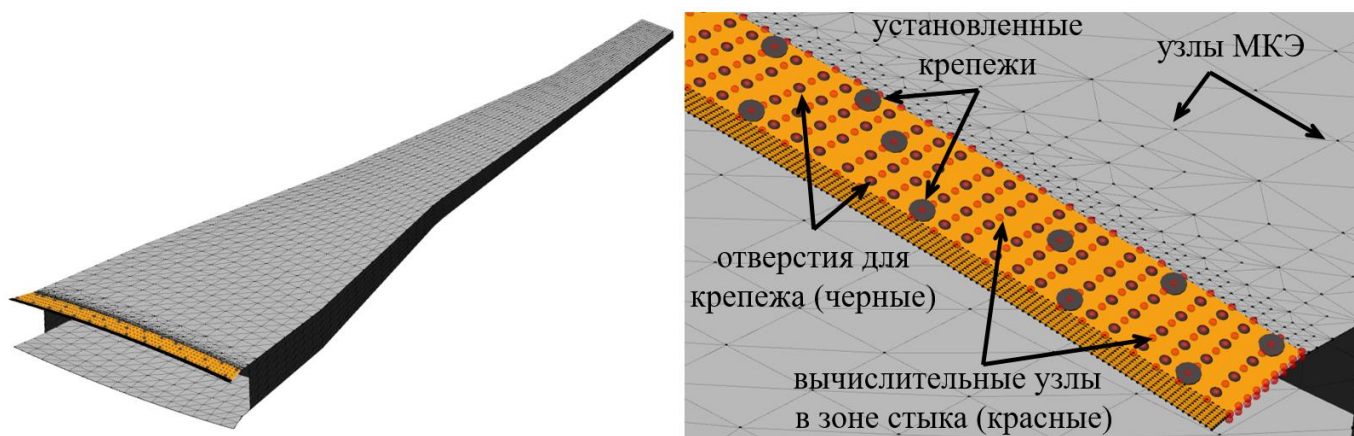


Рисунок 2 – иллюстрация модели соединения крыла и фюзеляжа

Задача 2. Минимизация вероятности дефекта. Вычислительный узел считается дефектным, если значение результирующего зазора в нем превосходит некоторое заданное значение g_* . Количество дефектных узлов определяется для расстановки крепежей H^0 и начального зазора g . Вероятность дефекта P_d для заданного числа крепежных элементов n_0 рассчитывается как отношение количества дефектных узлов к общему количеству узлов.

$$P_d(H^0, g_*) = \min_{H^0, |H^0|=n_0} \frac{\sum_{i=1}^{n_u} \theta(g_i^{res}(g, H^0) - g_*)}{n_u}, \quad \theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

Задача 3. Минимизация вероятности дефекта по всей вычислительной области. В случае всей области вероятность дефекта P_d^f для заданного числа

крепежных элементов n_0 рассчитывается и для промежуточных значений результирующего зазора, а не только для некоторой критической величины:

$$P_d^f(H_*, g_*) = \min_{H^0, |H^0|=n_0} \int_0^{g_*} P_d(H_*, \tilde{g}) d\tilde{g}. \quad (5)$$

Несмотря на то, что основная идея всех трех постановок оптимизационной задачи заключается в нахождении расстановки крепежей, способной свести начальный зазор до некоторого допустимого значения, выбор функции цели оказывает значительное влияние на результаты, что будет продемонстрировано ниже.

Метод локального полного перебора

Основной особенностью, которую необходимо учитывать при решении задачи оптимизации расстановки крепежных элементов, является бинарный характер переменных задачи (1, если отверстие занято крепежом, и 0 в противном случае), что означает, что задача оптимизации является комбинаторной и относится к классу NP-полных. Известно, что каждая такая задача может быть гарантированно решена методом полного перебора, который, не смотря на свою простоту и времязатратность, применяется при решении многих технических задач, поскольку гарантированно находит глобальный оптимум [12-14]. В данном случае число отверстий для расположения фиксирующих элементов может исчисляться сотнями, что делает невозможным применение данного метода в виду больших временных затрат на решение контактной задачи, однако можно рассмотреть модификацию, основанную на поиске локального оптимального решения для каждого крепежного

элемента при фиксировании позиций остальных элементов [15-16] (далее – *метод локальных вариаций*). Чтобы уменьшить количество вычислений на каждой итерации, крепежные элементы перемещаются внутри сферы радиуса r (рис. 3).

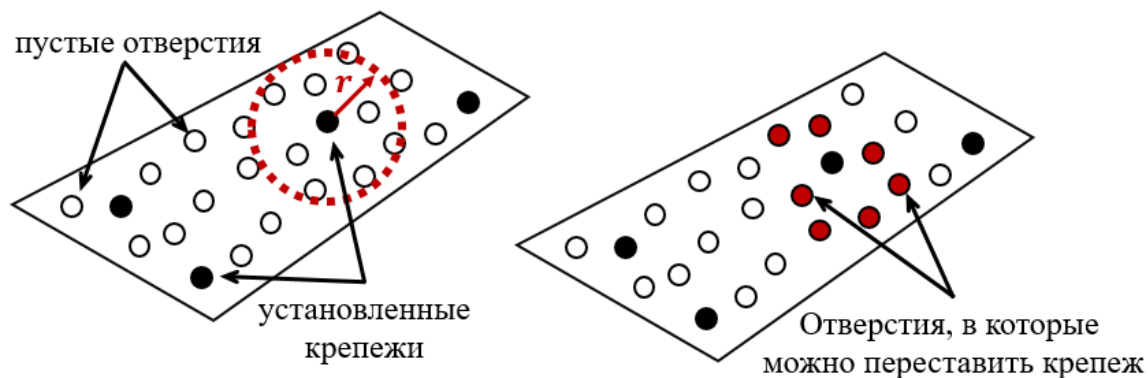


Рисунок 3 – иллюстрация выбора возможной новой позиции крепежа

Для некоторой функции цели $F(H)$, где H – расстановка крепежных элементов, начальной расстановки крепежей H^0 , начального зазора g , радиуса r , внутри которого возможна перестановка крепежа, и заданного оператора евклидова расстояния в пространстве $\rho(i, j)$ от точки i до точки j , алгоритм метода локальных вариаций может быть описан следующим образом:

Инициализация параметров $r, k := 0, H_k^0 := H^0$

Повторить:

Progress := 0

Для каждого занятого отверстия $i \in H_k^0$

Для каждого пустого отверстия j в радиусе r от занятого отверстия i , т.е.

$\rho(i, j) \leq r$

Получить новую расстановку H_k^* , переместив крепеж из отверстия i в отверстие $j \in H$

Вычислить изменение функции цели для нового расположения $\Delta F := F(H_*^0) - F(H_k^0)$

Если $\Delta F < 0$ (удалось уменьшить значение функции цели)

Сохранить полученную расстановку $H_{k+1}^0 := H_*^0$

$Progress := 1$

Иначе

$H_{k+1}^0 := H_k^0$

$k := k + 1$

Пока $Progress = 0$

Поскольку переход к новой итерации происходит только в случае нахождения расстановки, которая сообщает функции цели меньшее значение, полученное решение не может оказаться хуже начального приближения и алгоритм сходится к локальному оптимуму. Структура описанного алгоритма позволяет рассматривать любые из вышеперечисленных функций цели (3-5), а также их комбинации.

Результаты расчетов и анализ

Для вычислений была выбрана модель соединения двух частей фюзеляжа, на которой была верифицирована методология решения контактной задачи (1-2) путем сравнения с физическим экспериментом в работе [17].

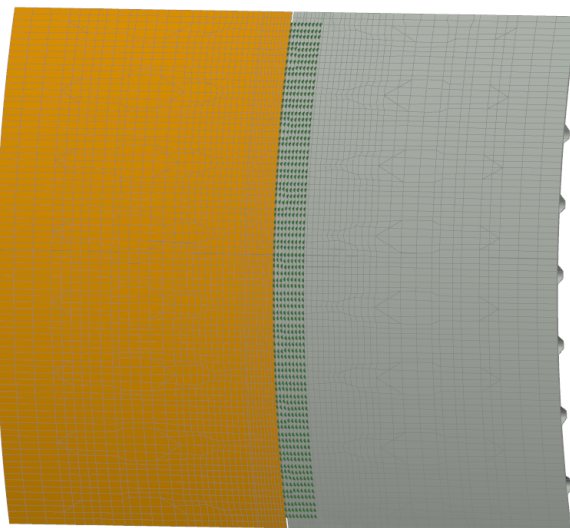
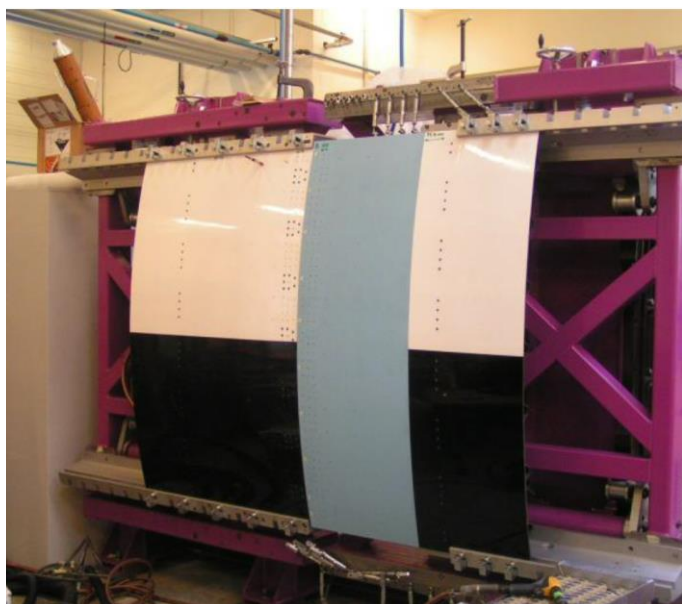


Рисунок 4 – фотография испытательного стенда и конечно-элементной модели

Случайным образом была сгенерирована начальная расстановка из пяти фиксирующих элементов (рис. 5). Начальный зазор был получен в результате измерений [17]. Модель состоит из 1400 узлов в зоне соединения деталей и включает в себя 140 отверстий, в которые могут быть установлены крепежные элементы.

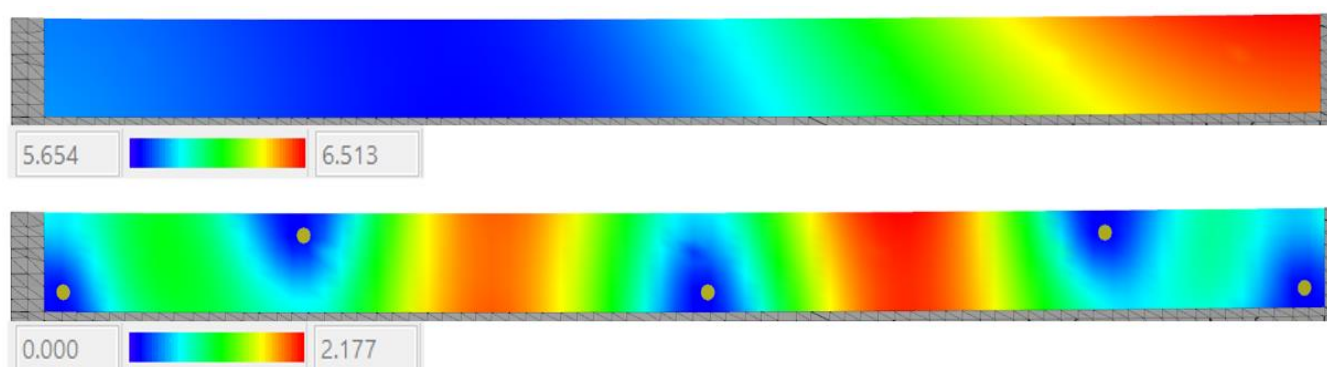


Рисунок 5 – начальный зазор (сверху) и результирующий зазор для начальной расстановки (снизу)

Поскольку метод локальных вариаций основывается на принципе жадного выбора, а максимальная величина результирующего зазора во многом является одним из главных критериев качества полученной расстановки, минимизация максимального зазора (3) приводит к ожидаемому уменьшению зазора с 2.177 мм до 1.923 мм. В случае задач (4) и (5), результат существенно зависит от выбранного параметра g_* , так как через него определяется является ли вычислительный узел дефектным (если значение результирующего зазора в нем превосходит g_*). В случае когда значение зазора g_* оказывается недостижимым для заданного количества крепежных элементов, может сложиться ситуация, когда результат оптимизации, являясь локально оптимальным, будет неприменим. Так, на рисунке 6 представлена полученная оптимальная расстановка при минимизации вероятности дефекта для $g_* = 0.5$.

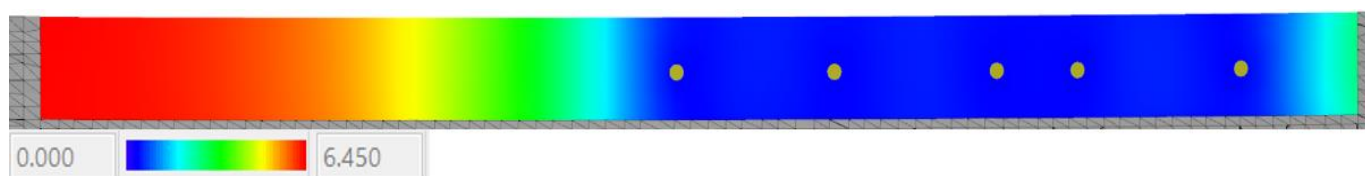


Рисунок 6 – минимизация вероятности дефекта для $g_* = 0.5$

Несмотря на то, что количество узлов с зазором больше 0.2 мм удалось уменьшить с 89.6% до 55.1%, величина максимального зазора практически не изменилась. Однако при $g_* = 1.6$, количество дефектных узлов с зазором больше 1.6 мм уменьшается с 30.3% до 0% и величина максимального зазора составляет 1.587 мм. Аналогичная ситуация складывается с задачей (5) (см. таблицу 1).

Таблица 1

Результаты оптимизации

Функция цели	Кол-во итераций	Максимальная величина зазора в зоне стыка, мм
Начальная расстановка	-	2.177
Минимизация максимального зазора	4	1.923
Минимизация вероятности дефекта ($g_* = 0.2$)	4	6.450
Минимизация вероятности дефекта ($g_* = 1.6$)	3	1.587
Минимизация вероятности дефекта во всей области ($g_* = 0.2$)	4	6.317
Минимизация вероятности дефекта во всей области ($g_* = 1.6$)	3	3.797

Обозначим функции цели из задач (3), (4) и (5) через $F_1(H)$, $F_2(H)$ и $F_3(H)$, соответственно. Для более качественной оценки качества полученных расстановок были построены статистические кривые (рис. 7) для пятидесяти сгенерированных начальных зазоров [18-19]. Для каждого начального зазора был посчитан результирующий зазор при установке полученных оптимальных расстановок крепежа. Кривые показывают процент вычислительных узлов, в которых значение результирующего зазора не превосходит соответствующее значение по горизонтальной оси. Этот подход позволяет более четко оценить характеристики расстановок крепежных элементов, поскольку представляет информацию, статически собранную по множеству начальных данных. Расстановка, полученная

при минимизации вероятности дефекта для $g_* = 1.6$ оказывается лучшей при валидации на сгенерированных зазорах (оранжевая кривая на рис. 7).

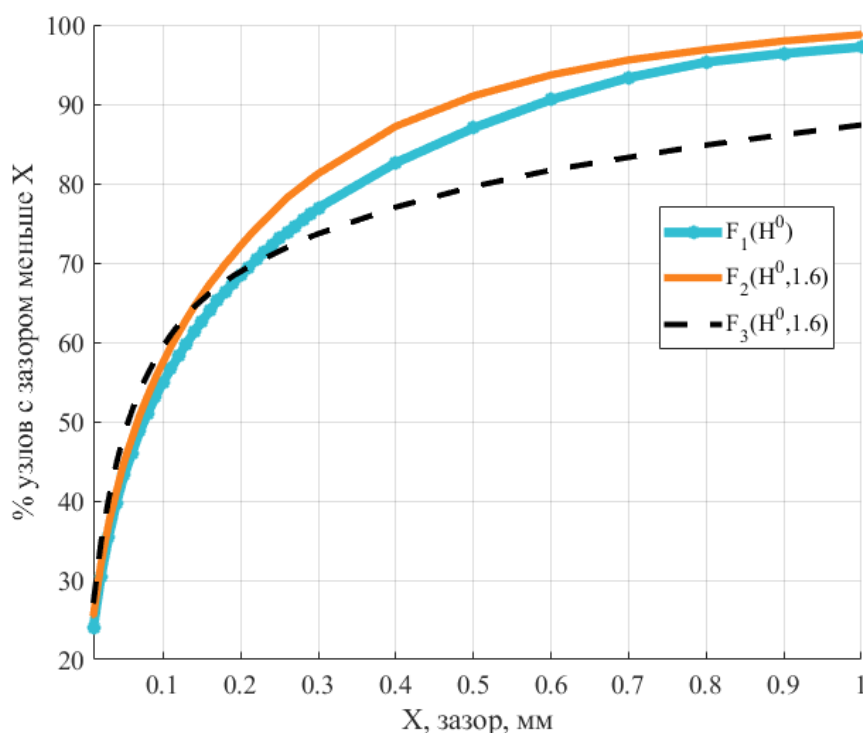


Рисунок 7 – статистические кривые для оценки полученных расстановок по множеству начальных зазоров

Функции цели в задачах (3-5) позволяют принять во внимание разные свойства решаемой задачи и, как было показано, могут приводить к существенно разным по качеству результатам, если рассматривать их по отдельности. В данном случае может быть сформулирована многокритериальная оптимизационная задача [20-21], способная учесть, как величину максимального зазора, так и долю дефектных узлов:

$$\tilde{F}(H^0, g_*) = (F_1(H^0), F_2(H^0, g_*), F_3(H^0, g_*)) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $H^0 = \{h_i^0\}_{i=1, n_f} \subset H$; n_f – общее количество установленных крепежных элементов [18-20].

Так как функции $F_2(H^0, g_*)$ и $F_3(H^0, g_*)$ обе нацелены на уменьшение дефектных узлов, возможно рассмотреть оптимизацию без одной из них. В таблице 2 приведены результаты многокритериальной оптимизации с различными комбинациями функций цели для разных значений параметра g_* .

Таблица 2

Результаты многокритериальной оптимизации

Функция цели	Кол-во итераций	Максимальная величина зазора в зоне стыка, мм
Начальная расстановка	-	2.177
$(F_1(H^0), F_2(H^0, 0.2))$	5	1.675
$(F_1(H^0), F_3(H^0, 0.2))$	5	1.577
$(F_1(HH^0), F_2(H^0, 0.2), F_3(H^0, 0.2))$	4	1.821
$(F_1(H^0), F_2(H^0, 1.6))$	3	1.532
$(F_1(H^0), F_3(H^0, 1.6))$	3	1.509
$(F_1(HH^0), F_2(H^0, 1.6), F_3(H^0, 1.6))$	3	1.519

Результаты, приведенные в таблице 2 показывают, что оптимизация совокупности всего двух функций позволяет получить лучшие результаты, даже когда параметр g_* оказывается существенно меньше достижимого минимального значения зазора для заданного количества крепежных элементов, который, строго говоря не известен заранее. Для полученных в результате многокритериальной оптимизации расстановок были построены статистические кривые на множестве

сгенерированных начальных зазоров (рис. 8). В отличие от оптимизации каждой функции цели по отдельности (рис. 7), многокритериальная оптимизационная постановка позволяет получить расстановки, качество которых не зависит от трудно оцениваемого параметра g_* , а максимальное значение результирующего зазора в области соединения для различных комбинаций минимизируемых функций отличаются друг от друга не более чем на 15% для одинакового набора входных данных.

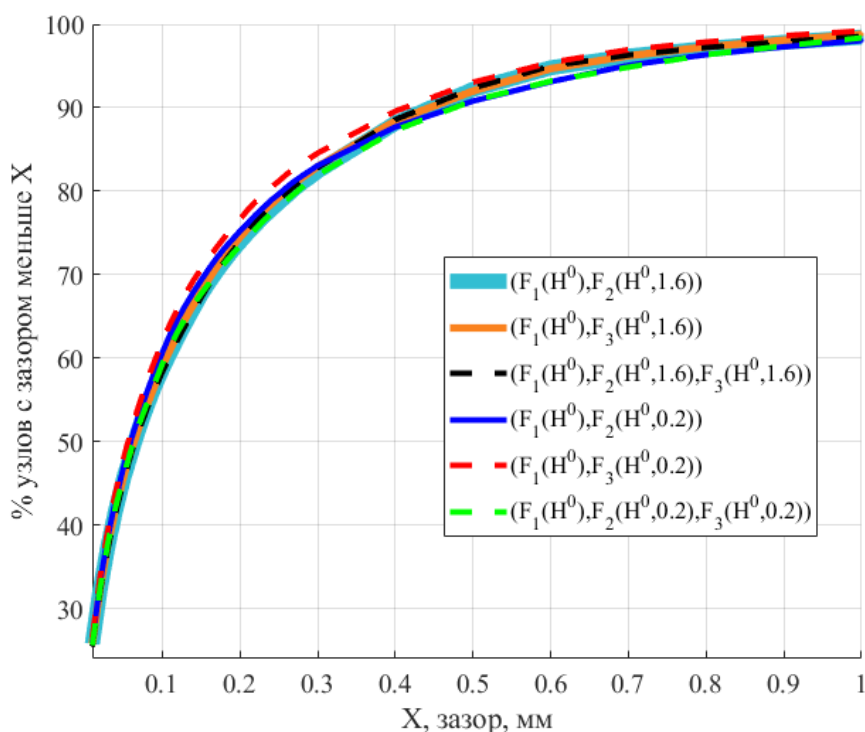


Рисунок 8 – статистические кривые для оценки полученных расстановок по множеству начальных зазоров, многокритериальная оптимизация

Заключение

В работе представлены три различные постановки задачи оптимизации положения временных крепежных элементов при сборке самолета, позволяющие

учесть максимальное значение результирующего зазора в области соединения, количество вычислительных узлов, результирующий зазор в которых превосходит некоторое заданное критическое значение и вероятности дефекта по всей вычислительной области. Была сформулирована многокритериальная оптимизационная задача, способная учесть, как величину максимального зазора, так и долю дефектных узлов. Для каждой постановки оптимизационной задачи были получены оптимальные расстановки методом локальных вариаций. Анализ полученных вычислений показывает, что добавление хотя бы одного критерия позволяет получать расстановки, менее зависящие от предопределяемых параметров и более качественные результаты.

Библиографический список

1. Bakker O.J., Popov A.A. and Ratchev S.M. Variation analysis of automated wing box assembly // The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Procedia CIRP 63, 2017. URL: <http://eprints.nottingham.ac.uk/41389/1/PROCIR-D-16-01298R1.pdf>
2. Liu S.C., Hu S.J. Variation simulation for deformable sheet metal assemblies using finite element methods // Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, no. 119 (3), pp. 368 – 374.
3. Muelaner J.E. and Maropoulos P. Large Scale Metrology In Aerospace Assembly // Proceedings of 5th International Conference on Digital Enterprise Technology, Nantes, France, 22-24 October 2008, available at: https://purehost.bath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/375063/Muelaner_DET_2008_52.pdf

4. Yang D., Qu W., Ke Y. 'Evaluation of residual clearance after prejoining and pre-joining scheme optimization in aircraft panel assembly' // *Assembly Automation*, 2016, no. 36(4), pp. 376 - 387.
5. Chickermane H., Gea H.C., Yang R.-J., Chuang C.-H. Optimal fastener pattern design considering bearing loads // *Structural Optimization*, 1999, no. 17(2), pp. 140 - 146.
6. Oinonen A., Tanskanen P., Bjork T., Marquis G. Pattern optimization of eccentrically loaded multi-fastener joints // *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2009, no. 40(1), pp. 597 – 609. DOI: [10.1007/s00158-009-0392-2](https://doi.org/10.1007/s00158-009-0392-2)
7. Eck C., Janusek J., Krbec M. Unilateral contact problems. Variational methods and existing theorems, Taylor and Francis, 2005, 398 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420027365>
8. Hlavacek I., Haslinger J., Necas J., Lovisek J. Solution of variational inequalities in mechanics, Springer-Verlag, 1998. DOI: [10.1007/978-1-4612-1048-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1048-1)
9. Lupuleac S.V., Petukhova M.V., Shinder Y.K., Bretagnol B. Methodology for solving contact problem during riveting process // *SAE International Journal of Aerospace*, 2011, no. 4 (2), pp. 952 - 957. DOI: [10.4271/2011-01-2582](https://doi.org/10.4271/2011-01-2582)
10. Petukhova M.V., Lupuleac S.V., Shinder Y.K., Smirnov A.B., Yakunin S.A., Bretagnol B. Numerical approach for airframe assembly simulation // *Journal of Mathematics in Industry*, 2014, no. 4 (8), pp. 12. DOI: [10.1186/2190-5983-4-8](https://doi.org/10.1186/2190-5983-4-8)
11. Stefanova M., Yakunin S., Petukhova M., Lupuleac S., Kokkolaras M. An interior-point method based solver for simulation of aircraft parts riveting // *Engineering Optimization*, 2017, no. 50(5), pp. 781 - 796. DOI: [10.1080/0305215X.2017.1355367](https://doi.org/10.1080/0305215X.2017.1355367)

12. Marx D. A parameterized view on matroid optimization problems // Theoretical Computer Science, 2009, no. 410(44), pp. 4471 - 4479. DOI: [10.1016/j.tcs.2009.07.027](https://doi.org/10.1016/j.tcs.2009.07.027)
13. Ашурков И.С., Лешко Н.А., Какаев В.В. Использование метода прямого перебора для оптимизации пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69752>
14. Рязанцева О.В. Жадный адаптивный метод случайного поиска глобального экстремума функций // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=25556>
15. Pogarskaia T., Churilova M., Petukhova M., Petukhov E. Simulation and optimization of aircraft assembly process using supercomputer technologies // Communications in computer and information science, 2019, vol. 965, pp. 367 - 378.
16. Zaitseva N., Pogarskaia T., Minevich O., Shinder J., Bonhomme E. Simulation of Aircraft Assembly Via ASRP Software // SAE Technical Papers, 2019, September, DOI:10.4271/2019-01-1887
17. Lupuleac S., Petukhova M., Shinder Y., Bretagnol B. Methodology for solving contact problem during riveting process // SAE Technical Paper, 2011, pp. 952 – 957. DOI:[10.4271/2011-01-2582](https://doi.org/10.4271/2011-01-2582)
18. 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, no. 141(6), DOI: [10.1115/IMECE2018-87058](https://doi.org/10.1115/IMECE2018-87058)

19. 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, Proceedings (IMECE), 2018, vol.2. DOI: [10.1115/IMECE2018-87058](https://doi.org/10.1115/IMECE2018-87058)
20. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. - М.: Радио и связь, 1992. - 504 с.
21. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. - М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1971. - 384 с.