

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕРНО-ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

М.А. Болотов, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов  
Научный руководитель: к.т.н. М.А. Болотов  
Самарский университет,  
Россия, г. Самара, Московское ш., 34, 443086  
E-mail: [v.a.pechenin@ssau.ru](mailto:v.a.pechenin@ssau.ru)

Сложные промышленные и наукоёмкие изделия характеризуются высокими требованиями к геометрической точности деталей и сборочных единиц. Геометрическая точность изделий закладывается на этапе проектирования. Пути достижения размерной точности определяются на этапе технологической подготовки производства. В производстве и сборке выполняется обеспечение размерной точности. Решение указанных задач на каждом из этапов может быть упрощено за счёт наличия математических моделей и измерительных средств, позволяющих прогнозировать и определять действительное значение геометрических параметров [1,2], характеризующих достижимую точность.

Разработана математическая модель, позволяющая проводить оптимизацию допусков геометрических параметров деталей сборки с целью обеспечения требований к сборочным параметрам при условии минимизации производственной трудоемкости. Объектом применения разработанной модели выступает турбина ГТД, а именно сборка проставки и диска. В качестве критериев оптимальности выступают: допуски на геометрические параметры, нормируемые на деталях сборочного комплекта, в т.ч.: отклонения формы и величина натяга сопрягаемых поверхностей. Модель направлена на обеспечение требований к точности следующих сборочных параметров: радиального биения и параллельности диска. Изменяемыми параметрами выступают отклонения формы сопрягаемых поверхностей деталей и величина натяга, определяемого отклонениями размеров сопрягаемых отверстия и вала.

Выполнялось моделирование геометрических отклонений формы и расположения. На детали проставка геометрическими параметрами являются: линейный размер между торцами сопряжения с диском и валом с допуском  $-0,14$  мм, перпендикулярность  $0,03$  мм цилиндрической поверхности сопряжения с валом Д относительно торца сопряжения с валом Ж, параллельность  $0,03$  мм торцевой сопрягаемой с диском поверхности относительно поверхности Ж и радиальное биение  $0,03$  мм сопрягаемого с диском отверстия относительно поверхности Д. На диске имеется сопрягаемая с проставкой цилиндрическая поверхность и торец, биение которого не должно превышать  $0,02$  мм. Помимо этого поверхности имеют нормирование по отклонению формы (отклонение от цилиндричности и плоскостности) в пределах  $0,03$  мм.

В общем виде контакт сопрягаемых соответственно пар поверхностей плоских и цилиндрических поверхностей происходит по конечному множеству точек. Такие задачи являются контактными. Известны аналитические решения контактных задач поверхностей, не имеющих отклонения формы. В работе для моделирования контактных задач поверхностей, имеющих отклонения формы, используется метод конечных элементов. Названный метод позволяет учесть особенности геометрии поверхностей, решать контактные и прочностные задачи.

Для моделирования сопряжений деталей разработана методика, включающая следующие этапы:

1. Создание действительных моделей деталей, формирование сборки. Действительные модели деталей представляют собой массивы точек их поверхностей.
2. Производится задание расчётной модели:
  - a. Построение триангуляционных сеток на поверхностях деталей.
  - b. Задание контактных пар поверхностей.
  - c. Задание ограничений на смещение деталей.
  - d. Задание внешних силовых факторов.
3. Выполнение расчета с использованием разработанной модели сопряжений поверхностей, описанной в работе [1] и основанной на использовании алгоритма ближайших точек [2,3], сохранение результатов.
4. Разработка модели обработки результатов расчёта, позволяющей определять сборочные

геометрические параметры на основании координат конечно элементной (триангуляционной) сетки и матриц перемещений, деформаций и напряжений.

5. Расчёт статистически показателей.

Выполнено шесть экспериментов с различными сочетаниями величин натяга и отклонений формы. В каждом из экспериментов проводился расчет сборочных параметров для 72 деталей с различными сочетаниями отклонений расположения и формы, изменяющихся в пределах предельных величин натяга и формы. В таблице 1 указаны предельные величины отклонений в каждом эксперименте.

Таблица 1 – Величины допусков изготовления диска и проставки

№ эксперимента	1	2	3	4	5	6
Предельное отклонение формы поверхностей, мм	0,03	0,01	0,03	0,003	0,003	0,003
Величина натяга в сопряжении отверстие-вал, мм	0,08	0,027	0	0	0,027	0,08

На рисунке 1 приведены значения математического ожидания  $\mu$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma$  сборочных параметров в каждом из экспериментов с доверительной вероятностью 99,73%.

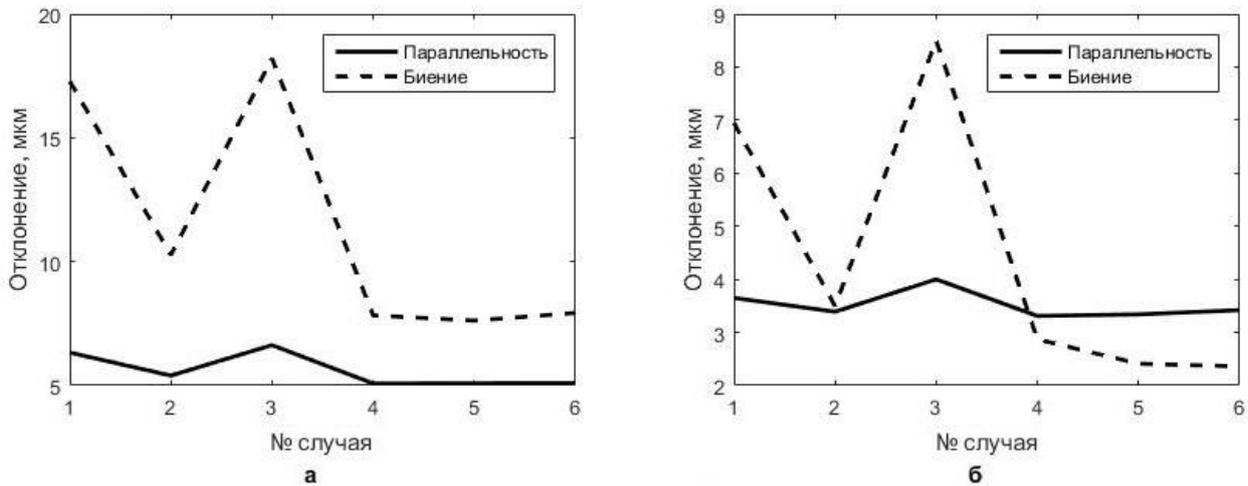


Рис. 1. Величины отклонений сборочных параметров в экспериментах:  $\mu$  (а) и  $\sigma$  (б)

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что необходимо стремиться к минимизации отклонения формы. При этом за счет доработки формы будет происходить уменьшение фактического натяга в соединении, но как показали эксперименты, точность сборочных параметров от уменьшения натяга при существенном снижении отклонения формы повышается. Тем не менее, выходить за границы предусмотренной конструкторской документацией величины натяга так же нельзя, однако можно выдержать нижнюю его границу, которая близка к нулю.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. О. В. Захаров, А. В. Кочетков. Минимизация систематической погрешности при бесцентровом измерении круглости деталей // Метрология. – 2015. - №4. – С. 20-27.
2. Печенкин М.В., Абзалов А.Р., Шустов В.Э. К вопросу разработки методики измерения параметров зубчатых колес с гиперболоидной делительной поверхностью и назначения норм точности // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2017. – Т. 20. – № 2. – С. 87-90.
3. Болотов М.А., Печенин В.А., Мурзин С.П. Метод оценки неопределённостей пространственного сопряжения высокоточных оптических и механических деталей // Компьютерная оптика. - 2016. - Т. 40. - № 3. – С. 360-369.
4. Besl P.J., McKay N.D. A method for registration of 3-D shapes // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – V.14. - № 2. – P. 239-256.
5. Tian H., Yang P., Su, C., Dong Z. ICP registration technology based on the coordinate system direction fit // International Journal of Security and its Applications. -2015. - V.9. - № 12. -P.47-56.