

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Болотова Михаила Александровича,

выполненную на тему:

**«Разработка методов создания цифровых технологических моделей
деталей и узлов ГТД для повышения технических показателей
их производства»**

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

1. Актуальность избранной темы.

Создание авиационных газотурбинных двигателей является одной из наиболее сложных и наукоемких отраслей машиностроения. Особые требования предъявляются к надежности двигателей и безопасности их эксплуатации. Комплекс характеристик, обуславливающий вероятность безотказной работы и технический ресурс двигателей, во многом определяется технологией изготовления деталей и сборки.

Важнейшую проблему представляет обеспечение предельного уровня вибрации авиационных газотурбинных двигателей, основной причиной которой является дисбаланс роторов. В свою очередь, дисбаланс возникает вследствие отклонения формы и расположения поверхностей деталей, неблагоприятного сочетания геометрических параметров деталей при сборке узлов. Современные цифровые технологии позволяют выйти на новый уровень обеспечения точности, как при изготовления деталей, так и при сборке.

Таким образом, актуальность темы диссертации Болотова Михаила Александровича, посвященной повышению технических показателей производства двигателей, обеспечению требований к точности сборки и снижению неуравновешенностей и вибраций роторов, не вызывает сомнений.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается корректностью постановки задач, применением для их решения проверенного математического аппарата,

Входящий № *2024-1009*
Дата 20 АВГ 2024
Самарский университет

экспериментальной проверкой теоретических результатов. Автором выполнен большой объем расчетных и экспериментальных работ, обосновывающих теоретические положения и принятые допущения и демонстрирующих применение разработанной методологии и программных средств. Выводы и рекомендации вытекают результатов из проведенных автором исследований, их обоснованность в целом не вызывает сомнений.

3. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованием расчетных данных с результатами приведенных в диссертации экспериментов по определению сборочных параметров и вибрационных характеристик модельных роторных узлов.

Научная новизна полученных в диссертации результатов состоит в следующем:

- разработана методология создания действительных моделей деталей и их использования при моделировании сопряжения контактных поверхностей при сборке узлов с учетом деформации деталей;
- разработан метод снижения неуравновешенности роторов ГТД с использованием цифровых двойников, учитывающий сопряжение деталей с учетом погрешностей изготовления и деформации деталей;
- разработан метод оптимизации сборки роторов с целью повышения точности сборочных параметров, снижения уровня вибрации, основанный на использовании действительных моделей деталей.

4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Наиболее важным научным результатом диссертационного исследования М.А.Болотова представляется методология создания и использования цифровых двойников в виде действительных моделей деталей при моделировании и оптимизации сборки роторов.

Совокупность разработанных в диссертации методик и программных средств представляет собой «технология цифровой сборки» и позволяет решать практические задачи обеспечения точности и производительности сборки узлов ГТД, снижения уровня вибраций двигателей.

5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты диссертационного исследования, в частности, программные продукты для моделирования и оптимизации сборки роторов, могут быть использованы на предприятиях, занимающихся разработкой, производством и ремонтом газотурбинных двигателей. В первую очередь, это - предприятия ОДК. Кроме того, широкой областью применения результатов могут быть отрасли машиностроения, связанные с созданием различных роторных машин: компрессоров, энергетических турбин, гидроагрегатов и т.д.

6. Анализ содержания диссертационной работы ее завершенность.

Текст диссертации изложен на 361 странице и состоит из введения, 5 глав, заключения, 8 приложений и списка использованной в работе литературы из 252 наименований.

В первой главе содержится развёрнутый анализ состояния проблемы. Представлен анализ основополагающих результатов в области обеспечения точности сборки двигателей, снижения дисбаланса роторов, снижения уровня роторных вибраций. Рассмотрен отечественный и зарубежный опыт использования цифровых технологий для обеспечения точности изготовления и контроля деталей ГТД, моделирования сборки узлов с учетом погрешностей изготовления деталей и их жесткости. Общее количество проанализированных источников более 250. Сделан вполне обоснованный вывод о перспективности использования цифровых технологий и о том, что требуют развития модели представления деталей и узлов, методы учета условий сопряжения поверхностей при сборке, алгоритмы определения рациональных условий сборки. Из проведенного анализа состояния проблемы логично вытекают сформулированные автором задачи диссертационного исследования.

Во второй главе введено понятие действительных моделей объектов для решения технологических задач обеспечения качества при производстве и ремонте ГТД. Разработана обобщенная методика создания действительных моделей деталей и узлов ГТД по результатам измерений. Разработаны программные средства для автоматизации создания действительных моделей деталей и технологических объектов.

Для реализации метода получения действительных размеров деталей разработана новая технология виртуальных мер и виртуальных комплексныхборок. Введены понятия «Виртуальная мера» и «Виртуальная комплектная сборка». Представляется важным, что в так называемой динамической

постановке виртуальные меры могут изменять свои размеры. Это позволяет учитывать жесткость деталей и их деформации при сборке.

В третьей главе предложен метод оценки точности сборочных параметров, отличающийся от известных методов расчета размерных цепей использованием действительных моделей и детальным учетом фактической формы сопрягаемых поверхностей. Сформулирован подход к конечно-элементному решению задачи контактного взаимодействия сопрягаемых деталей с учетом отклонений формы контактных поверхностей. Такой подход позволяет более точно учесть деформации деталей при сборке и их влияние на действительную геометрию собранных узлов.

В четвертой главе описывается метод снижения неуравновешенностей роторов в условиях цифрового производства на основе использования действительных моделей. Предложена структурно-параметрическая модель типового ротора. Балансировка ротора формулируется как задача оптимального поворота деталей друг относительно друга при сборке с учетом действительной формы сопрягаемых поверхностей и оптимального расположения балансировочных грузов. Критерием оптимизации выбран минимум виброскорости на опорах ротора. Предложен и реализован в программном обеспечении алгоритм цифровой балансировки, использующий на каждом шаге конечно-элементный анализ вибрационных характеристик. Апробация метода проведена на примере ротора турбины низкого давления. Следует отметить, что самостоятельную ценность представляет возможность использования предложенного метода для анализа влияния допусков на дисбалансы ротора.

В пятой главе разработанный метод и реализующие его программные средства использованы для совершенствования сборки компрессора низкого давления ГТД. Проведена оценка достоверности получаемых расчетным путем данных о сборочных геометрических параметрах ротора с экспериментальными. Последние получены путем измерений деталей и ротора в сборе. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями сборочных параметров достигает 30% и более, что свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования не самого метода, а средств его реализации.

Таким образом, диссертация М.А.Болотова является логически завершенным научным исследованием.

В автореферате отражены все основные результаты, полученные в работе. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации и полученным в диссертации научным выводам и рекомендациям.

Содержание работы достаточно полно отражено в более, чем 50 публикациях автора.

7. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации.

Основное достоинство диссертации состоит в большом объеме проведенных автором расчетных работ и экспериментов, серьезном математическом уровне теоретических исследований.

Основными *недостатками* в содержании и оформлении диссертации, наш взгляд, являются:

1. В п.3.4 задача определения узловых перемещений конечно-элементной модели формулируется в простейшей линейной постановке. Контактная задача механики деформируемого твердого тела – нелинейная, т.к. площадка контакта всегда неизвестна. В методе конечных элементов существует несколько подходов к ее решению. В диссертации и автореферате моделирование контакта подробно не обсуждается. Поэтому неясно, каким образом рассчитано напряженно-деформированное состояние узлов в приведенных в диссертации примерах.

2. В п.4.6 вибрации ротора моделируются с помощью метода конечных элементов. Получение расчетных данных об амплитуде виброперемещений, вброскоростей и виброускорений, реакциях в опорах неуравновешенного ротора предполагает задание матрицы демпфирования. В роторной динамике существует несколько методов определения ее элементов. В диссертации и автореферате моделирование демпфирования не обсуждается. Поэтому неясно, каким образом рассчитаны вброскорости в приведенных в диссертации примерах.

3. На рис.5.16 приведены граничные условия, задаваемые при моделировании сборки узла. Об их происхождении ничего не говорится. Если это усилия – непонятно, как они определены.

4. На рис.5.17 приведены поля перемещений деталей при сборке. Автор ошибочно называет их деформациями. Подобная ошибка допущена на рис.Д.9.

5. На рис.В.2 - В.5 автор приводит поля напряжений при моделировании болтового соединения, но не указывает, какая именно компонента тензора напряжений рассматривается, или речь идет об эквивалентных напряжениях? Подобная ошибка допущена на рис.Г.4 и Г.5.

Указанные замечания, хотя и снижают ценность работы, не влияют на ее общую оценку.

