

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

© 2012 М. А. Болотов, А. Н. Жидяев, О. С. Сурков

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

В статье приводится обзор проблем, встречающихся при моделировании технологических процессов производства авиакосмической техники. Обобщается опыт решения технологических задач на примере технологий электрохимического формообразования, механической обработки и координатных измерений геометрических параметров.

*Электрохимическая обработка, механическая обработка, координатные измерения, деталь, поверхность, погрешность, деформация, влияющий фактор, модель, численный метод, метод конечных элементов, метод Монте-Карло.*

Этап технологической подготовки производства сложных изделий авиакосмической техники является трудоёмким процессом. Качество проведения этого этапа во многом определяет затраты самого производства, связанные непосредственно с изготовлением деталей, а также с отработкой и доведением разработанных технологических процессов. В связи с этим на этапе технологической подготовки необходимо выявить и устранить все возможные неточности и ошибки, которые могут возникнуть при изготовлении деталей. Это возможно посредством моделирования процессов обработки и измерений.

Детали ракетной техники и авиационных газотурбинных двигателей имеют высокую сложность, что приводит к сложности проектирования их технологических процессов изготовления. В практике изготовления сложных деталей, таких как крыльчатки, лопатки, корпусные детали, валы, оси, возникают проблемы с обеспечением заданной точности. Зачастую нормируемые параметры точности для перечисленных деталей имеют пространственный характер. Оценка действительной точности при реализации той или иной схемы обработки является затруднительной.

Наиболее часто используются следующие производственные технологии:

– электрохимическая обработка (ЭХО) фасонных деталей;

– механическая обработка фасонных деталей;

– контроль геометрических параметров сложных деталей.

При моделировании перечисленных процессов возникают проблемы, обусловленные наиболее общими причинами:

– пространственным характером процессов;

– множеством влияющих факторов;

– высокой сложностью разработки аналитических моделей и учёта в них влияющих факторов;

– вероятностным характером и частично стохастической природой действующих погрешностей.

Поскольку разработка аналитических моделей, решающих все перечисленные проблемы, затруднена, то могут использоваться численные и численно-аналитические модели. Моделирование физических, электрохимических процессов может осуществляться с использованием численных моделей, основанных на методе конечных элементов. Моделирование вероятностных процессов измерения геометрических параметров может осуществляться с использованием численных моделей, основанных на методе Монте-Карло.

Рассмотрим выделенные производственные технологии и пути решения задач моделирования.

Для технологических методов обработки при подготовке производства требуются надёжные методики, позволяющие предсказать поведение детали и её нормируемых параметров точности в процессе обработки. Данные методики должны моделировать процесс деформаций от механической обработки и ЭХО. При разработке методик требуется определить оптимальные численные модели процесса резания и процесса ЭХО, дающие точный и адекватный результат, а также способы задания действующих параметров в технологической системе.

Существующие методики моделирования процесса электрохимического формообразования представляют собой частные математические модели процессов, соответствующих электрохимическому формообразованию пера, и явлений, вызывающих его отклонение от номинального положения. На процесс электрохимического формообразования действуют следующие факторы:

- нагрев технологическим током;
- силовое воздействие потока электролита;
- влияние наследственных остаточных напряжений.

Для учёта влияния всей совокупности факторов разработана методика моделирования, решающая типовые технологические задачи. Методика представляет собой последовательность, включающую моделирование процесса с использованием конечно-элементных моделей по исходным данным экспериментальных исследований, а также моделирование с использованием известных аналитических моделей.

В процессах механической обработки одним из проблемных аспектов является обеспечение точности деталей. Достижимый уровень точности определяется фактически погрешностями, исходя из принятого коэффициента точности на предприятии. Важнейшими причинами, вызывающими погрешности геометрических параметров деталей в процессах механической обработки являются деформации и вибрации упругой технологической системы. В аэрокосмической технике детали изготавливаются тонкостенными и ажурными, что обуславливает их низкую жёсткость и соответственно большие

деформации и вибрации при механической обработке.

Обычно после разработки операции механической обработки начиналась её обработка на станке: производилась корректировка режимов резания, в некоторых случаях изменялись схема базирования, конструкция приспособления и т.д. В случае серийного и массового производства это приводило к увеличению времени запуска деталей в серийное производство и увеличению себестоимости. В случае единичного производства себестоимость могла вырасти в разы, например, в связи с порчей дорогостоящей заготовки и инструмента или изготовлением негодной детали без возможности её доработки.

Существующие модели не всегда могли быть использованы для всего многообразия процессов обработки, схем базирования, используемого инструмента. В связи с этим была разработана методика моделирования деформаций и вибраций технологической системы при фрезерной и токарной обработках с применением метода конечных элементов [1].

Разработанная методика позволяет оценивать деформации и вибрации заготовки и инструмента, возникающие от сил резания при токарной и фрезерной обработках. При использовании методики выполняются следующие этапы: 1) создаются объёмные модели необходимых частей технологической системы; 2) создаётся конечно-элементная сетка; 3) задаются ограничения, условия контакта; 4) задаются точки приложения и величины нагрузок, время их действия; 5) производится вычисление, а затем анализ полученных результатов. В зависимости от результатов могут быть произведены уточняющие расчёты для получения более благоприятных условий обработки.

Для реализации данной методики была разработана последовательность действий при моделировании в программном комплексе Ansys.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования деформаций при фрезерной обработке тонкостенных пластин, закреплённых консольно [1], а также теоретические исследования вибраций при раста-

чивании колец и фрезеровании тонкостенных пластин.

Важной частью производственных процессов является контроль. Высокая сложность и точность изделий машиностроения в сочетании с большой номенклатурой ставят перед контролем сложные задачи. В число нормируемых характеристик входят линейно-угловые характеристики, погрешности формы и расположения сложных поверхностей, вызывающие наибольшую сложность при их контроле. Традиционно задачи контроля таких геометрических параметров деталей решались проектированием большого множества измерительной и вспомогательной оснастки. Однако такой подход не является конкурентоспособным в силу значительного уменьшения сроков вывода изделий на рынок и в некоторых случаях недостаточной точности. Решение данной проблемы лежит в использовании инновационных средств контроля, основанных на координатных измерениях.

Координатные измерения являются универсальным методом контроля геометрических параметров деталей и реализуются на координатно-измерительных машинах (КИМ), а также на обрабатывающих центрах, оснащённых щуповыми системами.

На погрешность координатных измерений оказывают влияние следующие факторы:

- инструментальные погрешности средства измерения, определяемые точностью кинематической и измерительной систем, параметрами окружающей среды;
- отклонения от номинальной геометрии поверхностей деталей;
- параметры методики измерения (количество и расположение измеряемых точек на поверхностях деталей);
- выбор заменяющей геометрии;
- используемые аппроксимирующие алгоритмы;
- внешние факторы.

Учитывая приведённые факторы, можно отметить, что моделирование процессов координатных измерений сопряжено со следующими трудностями:

– результат измерения содержит вносимые средством измерения погрешности, которые имеют вероятностную природу;

– измеряемые поверхности имеют сложную форму, включающую как систематическую, так и случайную составляющую;

– действительные поверхности деталей заменяются аппроксимирующими моделями;

– процесс измерения является дискретным, то есть результат измерения зависит от конечного числа измеренных точек;

– все влияющие факторы действуют совместно.

Поскольку зачастую невозможно разработать аналитическую модель, позволяющую учитывать все факторы, то возможно использовать численный метод Монте – Карло. Применение метода Монте – Карло ограничивается высокой трудоёмкостью при высоких требованиях к точности, сложностью реализации при моделировании отдельных задач. Преодоление ограничений возможно за счёт реализации комбинированных моделей. Комбинирование подразумевает частичное использование численного метода Монте – Карло, получение ряда аппроксимативных зависимостей и использование их для возможности реализации укрупнённых аналитических моделей как простейших геометрических параметров, так и параметров размерных комплексов.

Представленный подход был реализован в разработке обобщённой методики моделирования процесса координатных измерений. Методика включает в себя несколько этапов [2]: 1) детальное измерение поверхностей деталей; 2) анализ спектральных характеристик, определение составляющих погрешностей, их фильтрация на основе прямого и обратного преобразования Фурье; 3) конструирование поверхностей на основе информации о технологических методах обработки и параметрах погрешностей средств измерений; 4) имитирование выборок точек контролируемых поверхностей с учётом параметров методик измерения; 5) обработка выборок точек, получение параметров геометрии заменяющего элемента; 6) обработка статистических характеристик параметров геометрии; 7) построение регрессионных зависимостей погрешностей геометрических

параметров от параметров методики измерения; 8) решение прямых и обратных задач на основе полученных зависимостей, формирование методики измерения.

Для реализации модели был разработан ряд алгоритмов в системе MATLAB. К их числу относятся: 1) алгоритмы, моделирующие поверхности измеряемых деталей и учитывающие инструментальные погрешности средства измерения, погрешности от методов обработки; 2) алгоритмы, моделирующие процесс выборки координат точек с измеряемых поверхностей; 3) алгоритмы анализа спектральных характеристик, определения составляющих погрешностей и их фильтрации на основе прямого и обратного преобразования Фурье.

С использованием разработанной методики проведены исследования погрешностей измерения геометрических параметров цилиндрических [3] и плоских поверхностей [2].

Выбор названных поверхностей определялся их наличием у большинства деталей. Так, в конструкции ракетной техники и газотурбинных двигателей присутствует большое количество деталей типа «кольцо» и деталей, характеризующихся круглым сечением. Измерение данных деталей осуществляется заменяющими элементами «окружность» или «цилиндр». При их контроле ставятся задачи: 1) выявление отклонения формы; 2) определение радиуса (диаметра) поверхности, 3) определение координат центра.

Кроме того, у множества деталей ракетной техники и газотурбинных двигателей преобладают плоские поверхности. К таким деталям относятся корпуса, валы, диски, шестерни, фланцы трубопроводов и другие. К числу контролируемых геометрических параметров плоских поверхностей относятся: 1) отклонение от плоскостности; 2) позиционное расположение; 3) угловое расположение.

Проведены исследования погрешностей измерения приведённых выше геометрических параметров от параметров методики измерения (количества измеряемых точек и их расположения на поверхности) [2, 3]. Исследования показали их значительное влияние на погрешности измерения, что подтвердилось экспериментами.

Разработанная методика может использоваться для оценки действительной точности измерения геометрических параметров, а также для определения оптимальных параметров методик измерения, что способствует повышению эффективности использования КИМ.

В рамках исследований погрешностей координатных измерений проводились исследования процесса измерения с применением щуповых систем, которыми оснащены обрабатывающие центры с ЧПУ [4]. Рассмотрена схема погрешности измерения линейного геометрического параметра, выявлены основные источники ошибок. Рассматривался вопрос о возможности нормирования погрешностей измерительных средств станков с ЧПУ в соответствии с требованиями нормативных документов для координатно-измерительных машин: ISO10360 и методики поверки МИ2569-99.

Научно-исследовательская работа проводилась в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

### Библиографический список

1. Компьютерное моделирование деформаций заготовки в процессе фрезерной обработки [Текст] / М.А. Болотов, А.Н. Жидяев, А.В. Кузнецов [и др.] // Изв. Самар. науч. центра Российской академии наук. – Самара, 2011.- Т. 13. - №4. – С.140-147.
2. Болотов, М.А. Модели и методы оптимизации методик измерения деталей ГТД при их контроле на координатно - измерительных машинах [Текст] / М.А. Болотов, И.А. Лёзин // Вестн. СГАУ. – Самара, СГАУ, 2011. -№2 (26). – С. 140-149.
3. Оптимизация методик измерения геометрических параметров деталей ГТД при их контроле на КИМ [Текст] / М.А. Болотов, А.Н. Жидяев, А.О. Чевелева // Вестн. СГАУ. – Самара, СГАУ, 2011. - №3 (27). – С. 100-105.
4. Погрешности контактных измерительных средств станков с ЧПУ при контроле геометрических параметров изделий [Текст] / М.А. Болотов, А.Н. Жидяев, О.С. Сурков [и др.] // Вестн. СГАУ. – Самара, СГАУ, 2012. – Вып.3(34). – Ч.2. – С.157-163.

**TECHNOLOGICAL PROCESSES SIMULATION  
INCOMPLEX PARTS PRODUCTION OF AEROSPACETECHNICAL EQUIPMENT:  
PROBLEMS AND THE WAYS OF THEIR SOLVING**

© 2012 M. A. Bolotov, A. N. Zhidyaev, O. S. Surkov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

This article provides an overview of the problems encountered in the aerospace technical equipment manufacturing processes simulation. The experience of solving technological problems on the example of electrochemical shaping technology, mechanical machining and geometrical parameters coordinate measurements is generalizing.

*Electrochemical machining, mechanical machining, coordinate measurement, part, surface, uncertainty, deformation, influencing factor, model, numerical method, finite element method, Monte-Carlo method.*

**Информация об авторах**

**Болотов Михаил Александрович**, инженер кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [maikl.bol@gmail.com](mailto:maikl.bol@gmail.com). Область научных интересов: координатные измерения.

**Жидяев Алексей Николаевич**, инженер кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [a.n.zhidyaev@gmail.com](mailto:a.n.zhidyaev@gmail.com). Область научных интересов: обработка сложных поверхностей.

**Сурков Олег Станиславович**, кандидат технических наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [pdla@ssau.ru](mailto:pdla@ssau.ru). Область научных интересов: обработка сложных поверхностей.

**Bolotov Michael Alexandrovich**, engineer of aircraft engine production department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [maikl\\_bol@rambler.ru](mailto:maikl_bol@rambler.ru). Area of research: coordinate measurement.

**Zhidyaev Alexey Nikolaevich**, engineer of aircraft engine production department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [a.n.zhidyaev@gmail.com](mailto:a.n.zhidyaev@gmail.com). Area of research: machining of airfoil.

**Surkov Oleg Stanislavovich**, Candidate of Technical Sciences, associate professor of aircraft engine production department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [pdla@ssau.ru](mailto:pdla@ssau.ru). Area of research: machining of airfoil.