

УДК 621.9.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЯ НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ НЕПЛОСКОСТНОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВИАСТРОЕНИЯ

© 2012 А. О. Чевелева, М. А. Болотов

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

В статье рассматривается выявление неплоскостности при контроле на координатно-измерительной машине. В качестве образцов используются плоские поверхности после шлифования, электроэрозионной обработки и фрезерования. Исследуется влияние различных видов механической обработки на результаты выявления неплоскостности.

Координатно-измерительная машина, обобщенная методика моделирования, метод Монте-Карло, методика выполнения измерения, механическая обработка, неплоскостность.

При обработке плоских поверхностей в авиастроении зачастую используются методы шлифования, электроэрозионной (ЭЭО) и фрезерной обработки. Эти методы используются на окончательных операциях в процессе формирования ответственных геометрических параметров.

Одним из перспективных средств размерной метрологии является координатно-измерительная машина (КИМ). В связи с относительно высокой стоимостью станко-часа необходимо повышать эффективность использования КИМ за счет формирования рациональных методик выполнения измерения (МВИ), позволяющих обеспечить заданную точность контроля путем выявления рационально минимального количества точек контроля.

При использовании КИМ под параметрами МВИ подразумеваются:

- схема расположения точек контроля по поверхности,
- количество точек в выборке,
- типы используемых заменяющих элементов (ЗЭ) (линия, плоскость, окружность, цилиндр),
- схема формирования геометрического параметра (ГП).

Обзор опубликованных подходов и разработок в области моделирования координатных измерений геометрических параметров позволил сформировать обобщенную методику моделирования

процесса координатных измерений. Данная методика должна быть универсальной и позволять получать оценки погрешностей измерения геометрических параметров от влияющих факторов. Методика основана на использовании концепции «Виртуальная координатно-измерительная машина» [1], реализуемой с использованием метода Монте-Карло.

Суть методики моделирования сводится в имитации процесса контроля поверхности с различными МВИ. Первоначально производится генерация так называемого «облака точек», которое представляет собой исходную поверхность. Затем из исходного «облака точек» формируется вторичная выборка в соответствие с исследуемыми МВИ. После этого вторичное «облако точек» аппроксимируется с целью получения параметров заменяющей геометрии. После вычисления искомого геометрического параметра имитация процесса измерения повторяется с целью получения статистики по искомому параметру и производится оценка искомой случайной величины. Далее производится оценка степени приближения результатов, получаемых с использованием различных МВИ, к действительному результату, полученному по рассматриваемой генеральной совокупности. На рис. 1 приведена блок-схема методики моделирования процесса измерения.



Рис. 1. Блок-схема методики моделирования процесса измерения

Новизна используемого подхода заключается в том, что при решении задачи путем имитационного моделирования процесса координатного измерения и выбора рациональных параметров МВИ предлагается оперировать точками реальной поверхности, которые содержат в себе информацию о погрешностях, от совокупности технологических методов обработки деталей авиа- и двигателестроения; об инструментальной погрешности, вносимой средством координатных измерений, в частности, погрешности, связанной с конфигурацией выбранного датчика/щупа. Данные точки получаем путем предварительного сканирования исходной поверхности большим числом точек.

Недостатком данного способа является более высокая трудоемкость при сборе координат точек поверхностей, а в ряде случаев сложная осуществимость измерения такого количества точек.

Объектом исследования являлись пластины размером $34 \times 80 \text{ мм}^2$, прошедшие упомянутые виды обработки.

Предметом исследования являлся процесс выявления неплоскостности посредством измерения на КИМ DEA Global Performance 07.10.07, работающей в САМ-центре при СГАУ, с инструментальной погрешностью:

$$\Delta_L = 1,7 + \frac{L}{333}, \text{ мкм} \quad (1)$$

где L – длина измеряемой поверхности, мм.

Эксперимент проводился путем имитирования процесса измерения, математическая модель которого была реализована в пакете MATLAB® и основана на методе Монте-Карло. С целью накопления статистики и обеспечения сходимости метода Монте-Карло повторение составило 10000.

В качестве оценки отклонения результата измерения от действительного значения выступала доля ошибки для i -ого плана эксперимента [2], вычисляемая по формуле:

$$B_i = \frac{f^0 - \mathcal{F}_i}{f^0} \quad (2)$$

где f^0 – действительное значение параметра формы в единицах измерения параметра для i -ого плана эксперимента;

\mathcal{F}_i – оценка геометрического параметра «неплоскостность» в единицах измерения параметра для i -ого плана эксперимента.

Первоначально проводился опыт по выявлению наилучшей для данного типоразмера схемы расположения точек контроля по поверхности.

Рассматривалась схема неупорядоченной выборки и «Модифицированная шахматная доска».

Согласно первой схеме расположения точек контроля, первые четыре контролируемые точки располагаются близко к углам, пятая – в центральной области образца, все остальные генерировались случайным образом точки с учетом равномерного покрытия поверхности образца.

В основе второй схемы лежат рекомендации [3]. В соответствии со вторым вариантом измеряемая плоскость разбивалась на сегменты, близкие по форме к квадрату, и в полученные сегменты вносилось по одной точке. Положение каждой точки определялось случайным образом на основе равномерного распределения.

Однако в большинстве случаев области на границе образца не были охвачены при генерации выборок, что противоречит существующей практике измерений (рис.

2,а). С целью устранения данного недостатка была введена корректировка [4], в соответствии с которой точки крайних сегментов генерировались на основе распределения Пуассона с математическим ожиданием, приближающим координаты точек к границам образца (рис. 2б).

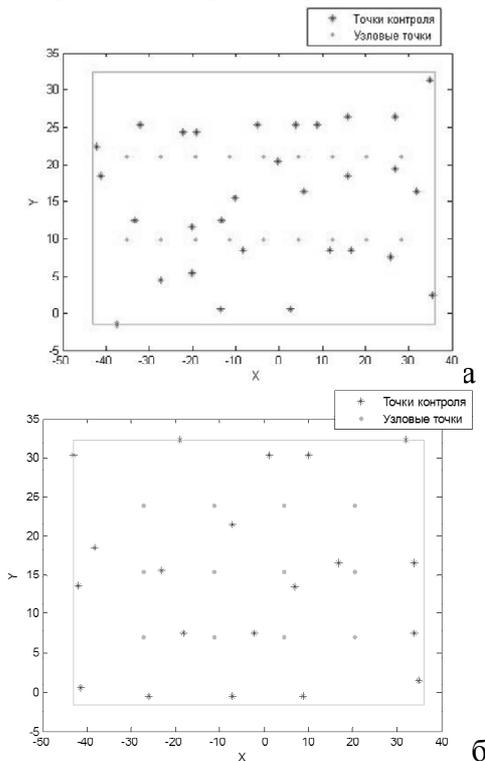


Рис. 2. Пример распределения точек по поверхности при: а – тридцати контролируемых точках, при котором границы исследуемого образца остаются неохваченными, б – двадцати контролируемых точках согласно схеме «Модифицированная шахматная доска»

Объектом исследования являлась пластина после ЭЗО.

ЭЗО представляет собой метод удаления материала (в частности, труднообрабатываемого) с поверхности под воздействием искрового разряда в среде жидкого диэлектрика. Установлено, что чем больше импульс, тем грубее поверхность; точность тем выше, чем более жестко закреплен инструмент. ЭЗО используется для обработки проводящих материалов, есть возможность обработать полупроводники и диэлектрики [5]. ЭЗО имеет ограниченное применение для обработки силовых деталей авиационных и ракетных двигателей из жаропрочных сплавов. В некоторых случаях этот метод применяется, например, для обработки лопаток турбин за одно целое с

диском. ЭЗО обработка создает в поверхностном слое термохимическое упрочнение и технологические макронапряжения, величина которых зависит от режима обработки.

ЭЗО приходит на смену традиционным металлорежущим технологиям и особенно широко применяется при изготовлении пресс-форм, вырубных и чеканочных штампов. ЭЗО позволила снизить трудоемкость изготовления фигур обрезных штампов до пяти раз и значительно повысить их стойкость.

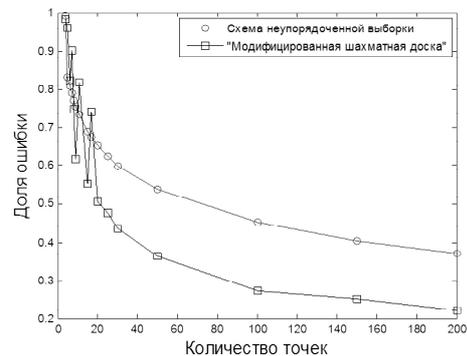


Рис. 3. Доля ошибки при выявлении неплоскостности при различных правилах расположения точек контроля для пластины после ЭЗО

В результате опыта выявлено (рис. 3), что при условии данной конфигурации плоскости (отношение сторон, габариты) в качестве правила расположения точек на плоскости предпочтительно использовать стратегию «Модифицированная шахматная доска», которая обеспечивает лучшее покрытие поверхности точками в условиях данной задачи. Наличие «зубцов» на графиках вовсе не характеризует процесс как неустойчивый, а обусловлено тем, что при некотором количестве точек при условии приближения геометрии сегмента к квадрату реализуется второй вариант, который является неблагоприятным.

Координата точки контроля также содержит в себе инструментальную погрешность, что препятствует определению действительного значения отклонения от плоскостности. С целью определения действительного значения отклонения от плоскостности исходная поверхность (рис. 4,а для шлифованной поверхности) подвергалась фильтрации (рис. 4,б для

шлифованной поверхности) от погрешности измерения путем использования алгоритма прямого и обратного преобразования Фурье.

Вначале вычислялись параметры спектральной плотности мощности. Затем осуществлялась очистка спектра измеренной поверхности от высокочастотной незатухающей части спектра, соответствующего измерительной погрешности. Затем с использованием

алгоритма обратного преобразования Фурье производилась реконструкция поверхности по скорректированным спектральным характеристикам. В результате формировалась очищенная от измерительной погрешности поверхность. Фильтрация позволяет приблизиться к достоверным оценкам измеряемой поверхности, а также оценить форму макрогеометрии.

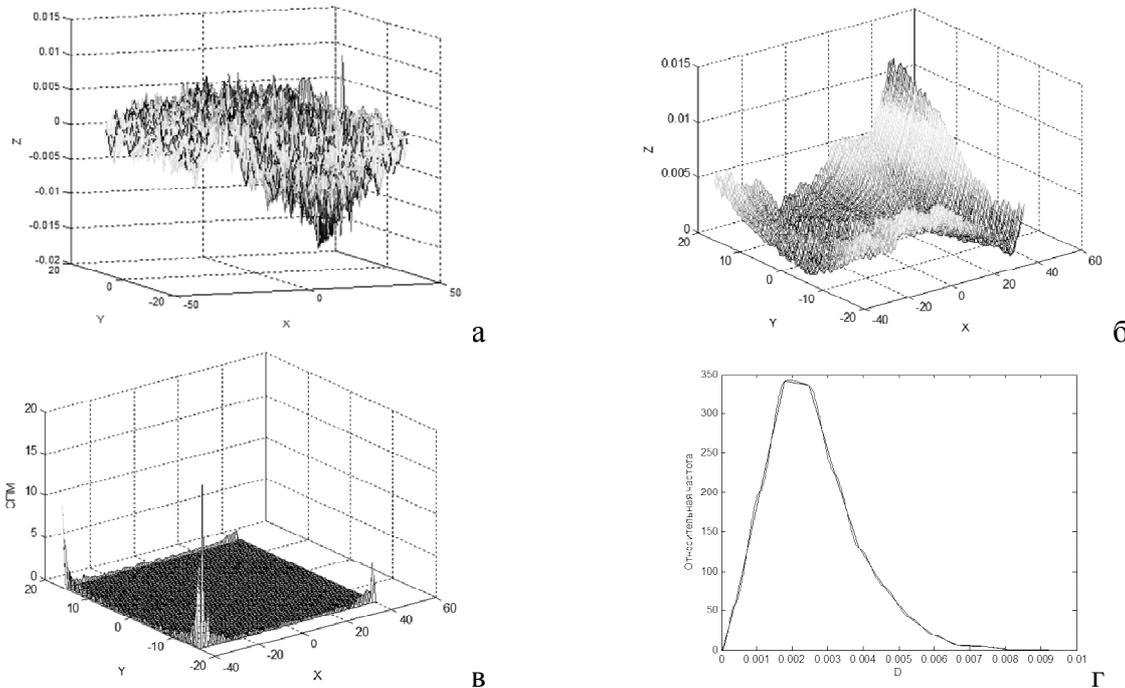


Рис.4. Шлифованная поверхность: а – детально измеренная поверхность; б – отфильтрованная от измерительной погрешности поверхность; в – очищенная поверхность спектральной плотности мощности; г – график распределения для выборки D, являющейся разностью координат Z между поверхностями а и б

Проведенный для шлифованной поверхности опыт по установлению влияния измерительной погрешности КИМ на выявление отклонения формы показал (рис.5,а) целесообразность применения фильтрации, в частности с помощью преобразования Фурье, вследствие сильного влияния измерительной погрешности при выявлении формы.

С целью проверки соответствия отфильтрованной части инструментальным погрешностям КИМ был построен полигон распределения выборки D, являющейся разностью координат Z между точками исходной и отфильтрованной поверхности (рис. 4,г). Анализируя её, можно заключить, что наибольшую вероятность составляют разности в диапазоне от 1 до 3 мкм, указывающие на инструментальную

погрешность КИМ. Остальная маловероятная часть отфильтрованных точек с величиной более 2,05мкм может быть объяснена выбросами.

С целью определения влияния реконструкции исходной поверхности при использовании Фурье-преобразования на результаты моделирования проводился эксперимент. По исходной поверхности вычислялись спектральные характеристики с помощью прямого преобразования Фурье, а затем с помощью обратного преобразования Фурье по полученным характеристикам осуществлялось восстановление поверхности. Проводился эксперимент для исходного массива точек и для точек, прошедших прямое и обратное преобразование Фурье без изменения спектра. Исходя из рис. 5,б, можно сказать,

что само преобразование Фурье практически не искажает результаты, отличие составляет до

6%.

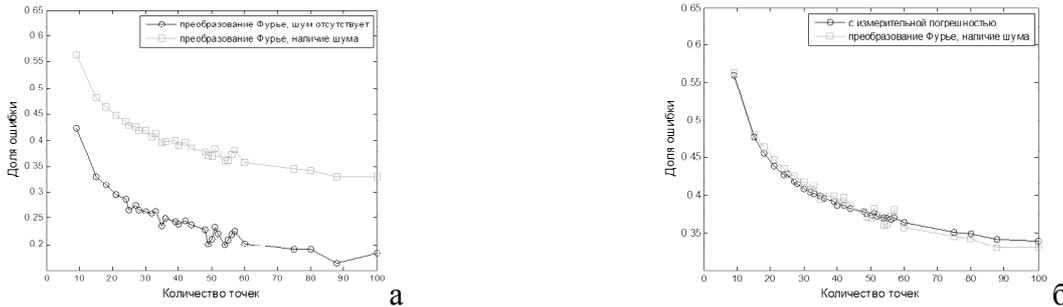


Рис. 5. Сравнительные графики доли ошибки выявления формы при для шлифованной пластины в случае преобразования Фурье: а – с фильтрацией данных, б – без фильтрации данных

Таким образом, отклонение формы пластины, приведенной на рис. 4, после обработки шлифованием имеет вид изгиба. Вероятно, это вызвано процессами врезания шлифовального круга либо влиянием внутренних напряжений, релаксация которых привела к деформациям.

Образец, прошедший ЭЭО, имеет выпуклую в центре форму (рис. 6), что может быть вызвано термическими деформациями обработки инструментом-проволокой и затруднением отвода шлама из центральной части межэлектродного зазора.

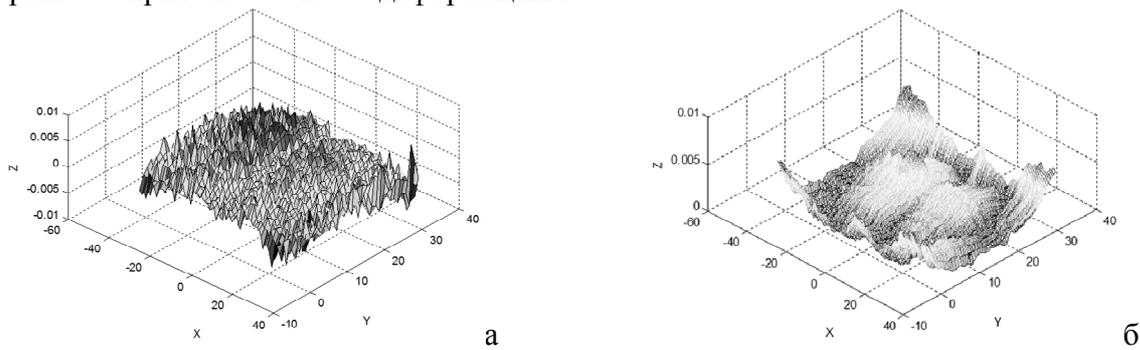


Рис. 6. Поверхность, полученная методом ЭЭО:

а – измеренная поверхность; б – отфильтрованная от измерительной погрешности поверхность

После фрезерной обработки концевой фрезой Ø25мм наблюдается волнистость (рис. 7), обусловленная появлением строчек между проходами фрезы.

Далее проводилась имитация измерения поверхностей пластин, обработанных вышеупомянутыми методами, с различным количеством измеряемых точек.

Рассматривался геометрический параметр отклонения формы.

На примере фрезерованной пластины проведен анализ полигонов распределения случайной величины (для остальных рассмотренных видов обработки зависимость носит аналогичный характер).

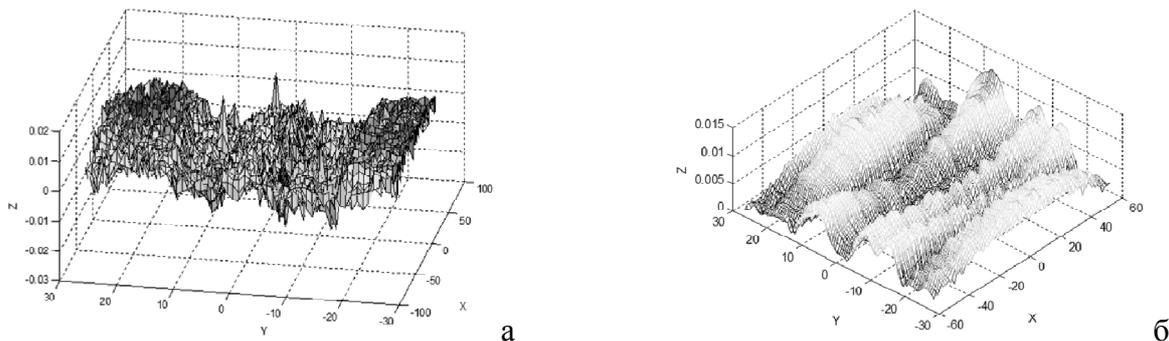


Рис. 7. Поверхность полученная фрезерованием: а – измеренная поверхность; б – отфильтрованная от измерительной погрешности поверхность

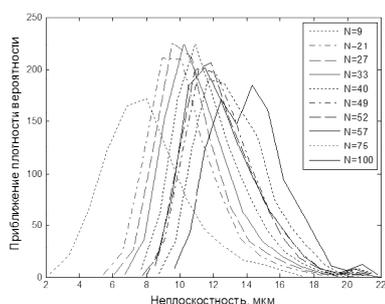


Рис. 8. Полигон распределения случайной величины «неплоскость» в зависимости от количества контролируемых точек

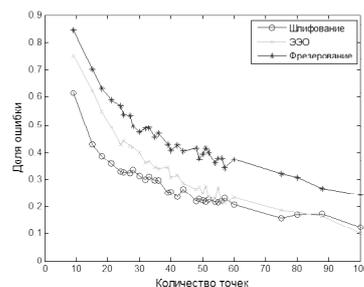


Рис. 9. Зависимость доли ошибки от количества точек контроля для различных видов механической обработки

Согласно данному анализу (рис. 8), при увеличении точек контроля происходит смещение центра группирования. Случайная величина не подчиняется нормальному закону распределения, что выявлено при проверке на нормальность с помощью критерия Пирсона. Поэтому вероятностные границы измеряемой величины определяли, исходя из аналитического выражения функции плотности вероятности, получаемого путем аппроксимации гистограммной выборки кубическим полиномом Эрмита. Этот способ позволяет достоверно получать теоретические оценки в случае, когда выборка не подчиняется ряду известных распределений.

По результатам опыта (рис. 9) следует отметить значительное влияние метода технологии механической обработки на результаты измерения. Рис. 9 показывает, для высокой достоверности выявления отклонения формы при контроле шлифованных поверхностей с такой же схемой обработки необходимо 30 точек (значение получено для доли ошибки 0,3).

Библиографический список

1. Wilhelml R.G. Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement [Text] / R.G. Wilhelml, R. Hocken, H. Schwenke. – Elsevier, 2003. – Pp. 553–563.
2. Maheshwari, N. On the selection of CMM based inspection methodology for circularity tolerances [Text] / N. Maheshwari. – Elsevier, 2001. – 58 Pp.
3. Flack, D. CMM measurement strategies [Text] / D. Flack // NPL Measurement good practice guide. – 2001. – №41. – 99 Pp.
4. Чевелева, А.О. Имитационные алгоритмы генерации разреженных выборок контролируемых точек при координатных измерениях [Текст] / А.О. Чевелева, М.А. Болотов// Региональная научно-практическая конференция, посвящённая 50-летию первого полёта человека в космос. Самара, 14-15 апреля 2011 г.: тезисы докладов. – Самара: Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2011.– С. 145-146
5. Братухин, А. Г., Язов Г. К., Карасев Б. Е. и др. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей [Текст]/ А.Г. Братухин, Г. К. Язов, Б. Е. Карасев и др.— М.: Машиностроение, 1977.

RESEARCH OF TECHNOLOGICAL HEREDITY INFLUENCE ON SETTING OF PROCEDURE OF MEASUREMENTS ON COORDINATE-MEASUREMENT MACHINE IN CASE OF OUT-OF-FLATNESS DETECTING FOR AIRCRAFT ENGINEERING PARTS

© 2012 A. O. Cheveleva, M. A. Bolotov

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

This paper deals with out-of-flatness detection in case of control on CMM. As samples the flat surfaces after grinding, electrical discharge machining and milling are considered. The research of different machining on our-of-flatness detecting results is done.

Coordinate measuring machine, generalized modeling methodology, Monte-Carlo method, procedure of measurements, machining operation, out-of-flatness.

Информация об авторах

Чевелева Анастасия Олеговна, магистр, Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: Stasia-5@yandex.ru. Область научных интересов: координатные измерения.

Болотов Михаил Александрович, инженер кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: maikl_bol@rambler.ru. Область научных интересов: координатные измерения.

Cheveleva Anastasia Olegovna, magister, Samara state aerospace university named after academician S.P.Korolev (SSAU). E-mail: Stasia-5@yandex.ru. Area of research: coordinate measurement.

Bolotov Michael Alexandrovich, engineer of the aircraft engine production department (AEP), Samara state aerospace university named after academician S.P. Korolev (SSAU). E-mail: maikl_bol@rambler.ru Area of research: coordinate measurement.