

номикроскопический анализ структуры покрытий показывает, что они имеют мелкий размер зёрен, однако промежутки (поры) между ними оказываются соизмеримыми с размерами зёрен. Поэтому однородность  $F_{40}$  покрытий, осаждаемых методом КИБ, оказывается значительно выше. Слабым звеном покрытий, осаждаемых методом КИБ, является их низкая связь с подложкой [1]. В результате трещины, образующиеся в покрытии, расслаиваются под покрытием, что облегчает их отрыв. В пластинах с покрытиями методом ГТ трещины прорастают в основу и разрушаются вместе с объемами твердых сплавов, образуя характерные «борозды» [1].

Проведенный фрактальный анализ структур покрытий позволил наметить пути совершенствования составов покрытий с использованием мультифрактальной параметризации.

На рис. 3 приведены микрофотографии покрытий TiN и TiC+TiCN+TiN.

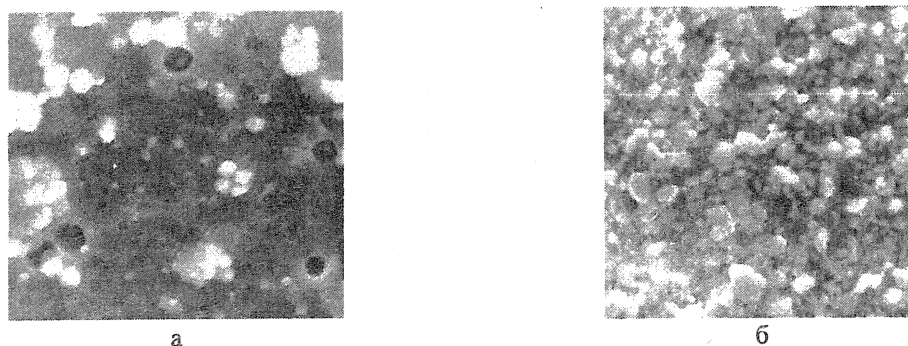


Рис. 3. Микрофотографии структуры покрытий: а) TiN; б) TiC+TiCN+TiN (x 5000)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабалдин Ю. Г. Структура, прочность и износостойкость композиционных инструментальных материалов. - Владивосток: Дальнаука, 1996. - 183 с.
2. Встовский Г. В., Колмыков А. Г. Использование подходов теории информации в физике конденсированных сред /Сб. Синергетика 2000. Самоорганизующиеся процессы в системах и технологиях. Комсомольск-на-Амуре, 2000. - С. 55-64.

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

УДК 621.9

В. Ф. КУЗЬМИН

### ПРОБЛЕМЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Рассмотрены проблемы высокоскоростного фрезерования криволинейных поверхностей в деталях летательных аппаратов и предложены пути их решения.

Современное состояние станкостроительной и инструментальной промышленности позволяет существенно поднять верхние границы скоростей обработки различных мате-

риалов. Широкое распространение получило высокоскоростное фрезерование (ВСФ), которое является одним из методов повышения производительности, улучшения качества обработанной поверхности и исключает ручную доработку. Наибольший экономический эффект может быть достигнут при обработке изделий, содержащих сложные криволинейные поверхности, характерные для деталей летательных аппаратов.

Однако решение задачи оптимизации и эффективного управления высокоскоростным фрезерованием резанием деталей из легких сплавов и, особенно из закаленных сталей связано с некоторыми особенностями и сложностями. К ним, прежде всего, следует отнести кинематику применяемого станочного оборудования и приводы перемещаемых узлов, участвующих в формообразующих движениях и программно-аппаратное обеспечение.

Внедрение ВСФ в производство требует также использования новых перспективных наукоемких технологий:

- широкое использование CAD/CAM систем;
- модернизации существующих станков с ЧПУ (или их полной замены, что в настоящее время довольно затруднительно);
- применение новых методов интерполяции сложных криволинейных поверхностей.

Прежде всего, необходимо отметить, что количество CAD/CAM систем, представленных на рынке, довольно обширно, поэтому выбор подходящей системы может быть затруднительным. Однако особенности ВСФ выдвигают ряд требований к возможностям и ограничению таких систем:

- создание аттракторов с выбором оптимальной нагрузки на инструмент;
- уменьшение или исключение «опасных участков» фрезерования;
- минимизация «резания по воздуху»;
- широкое использование петель и различных криволинейных траекторий для уменьшения инерционных сил;
- использование в УП специальных технологических приемов (врезание сверху, трохойдальная обработка, NURBS-интерполяция и т.д.).

NURBS - это «Non-Uniform Rational B-Spline» (неоднородный рациональный B-сплайн). Неоднородный (Non-Uniform) означает, что различные области объектов NURBS (кривых или поверхностей) обладают различными свойствами (весами), значения которых не равны между собой. Рациональный (Rational) указывает, что объект NURBS может быть описан с помощью математических формул. (B-Spline) - это любая гладкая кривая, определенная в трехмерном пространстве, нормаль которой может иметь любое направление. Хотя система NURBS сплайнов может описать кривые любой формы, однако его математический аппарат оказывается сложным.

Традиционно существующие способы и кинематика станочных механизмов, как правило, реализуют алгоритмы интерполяции криволинейных траекторий ломаными с дискретными значениями направления перемещения инструмента в конечных точках интерполируемых участков. Уменьшение длины интерполируемых участков увеличивает объем УП. Кинематика станочных механизмов основана на изменении направления траектории обработки поворотом инструмента относительно взаимно перпендикулярных осей. В связи с этим конструкция исполнительных механизмов имеет недостаточную жесткость вследствие удаленности инструмента от этих осей.

Одна из проблем высокоскоростной обработки заключается также и в том, что при перемещении исполнительных механизмов станка с большими скоростями невозможна их мгновенная остановка или изменение направления движения в силу инерционности пере-

мещаемых масс. Другими словами, при скоростной обработке традиционными способами большая нагрузка ложится на приводы станка и режущий инструмент.

ВСФ также ставит достаточно сложные задачи перед системой управлением станком. Трудоемкость подготовки программы существенно зависит от числа управляющих и одновременно обрабатываемых координат станка. Например, требования к точности обработки деталей с криволинейными поверхностями обуславливают использование пятикоординатной (многокоординатной) обработки, программа которой предусматривает расчет локальных параметров обрабатываемых поверхностей - опорных точек траектории обработки, координат векторов нормали и образующей, времени перемещения фрезы, пересчет полученных величин в систему координат станка, расчет закона движения инструмента - определение положения исполнительных органов станка, соответствующее каждой опорной точке траектории обработки (координаты X, Y, Z центра фрезерной головки станка и две угловые координаты), учет вида обработки, которую предстоит запрограммировать (обработка торцом, периферией или торцевой частью цилиндрической концевой фрезы), расчет угловых величин в координатной схеме фрезерной головки, расчет управляющей информации к интерполятору, расчет кадров управляющей информации по закону движения инструмента относительно детали и т.д.

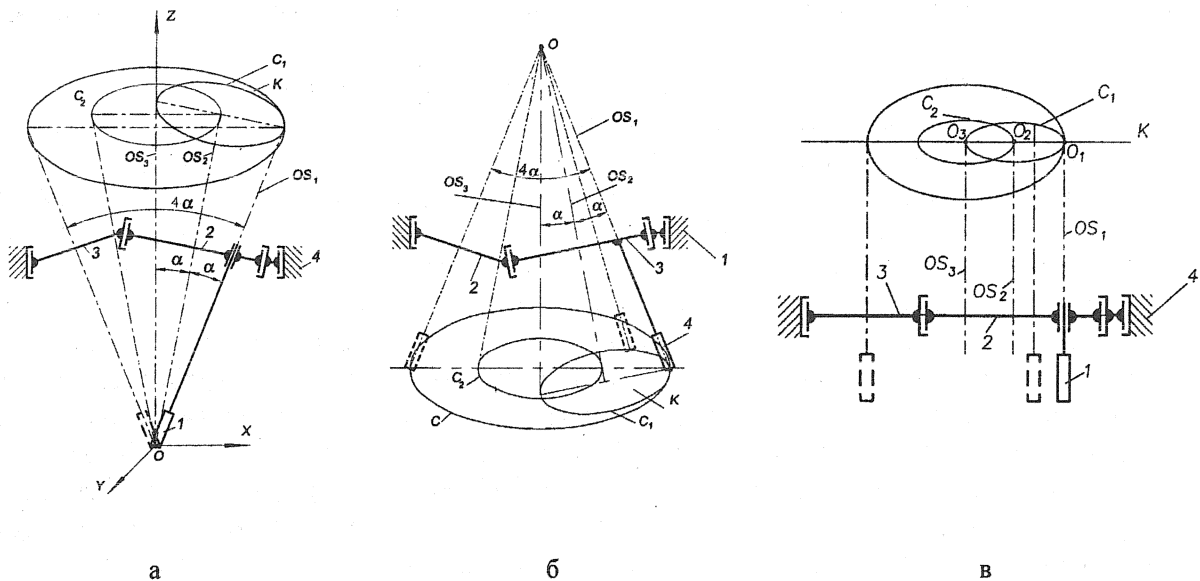


Рис. 1. Кинематические схемы высокоскоростной обработки: а) кинематическая схема формообразования с общей точкой в зоне обработки; б) кинематическая схема формообразования с общей точкой за пределами зоны обработки; в) кинематическая схема обработки с вращением инструмента вокруг параллельных осей

Кроме того, для использования ВСФ необходимо применение новых методов конструкторско-технологической подготовки производства и повышения управляемости станков с ЧПУ для обеспечения точности обработки при высокой скорости резания. Это обуславливает поиск современных подходов к указанной проблеме.

Станки для высокоскоростной обработки должны обладать высокой кинематической точностью и жесткостью. Для максимального снижения нагрузки на приводы и режущий инструмент необходим комплекс мероприятий, реализация которого возможна как программными, так и аппаратными средствами. На стадии подготовки управляющей про-

граммы (УП) - регулярных аттракторов необходимо точно рассчитывать траекторию криволинейного (пространственного) движения инструмента. Сам объем УП в значительной степени зависит от метода интерполяции траектории обработки. Важным моментом непосредственно в процессе обработки является скорость передачи и необходимой коррекции аттракторов (УП), что зависит от выбранных аппаратных средств.

Поэтому представляется необходимым использование других алгоритмов интерполяции сложных криволинейных поверхностей, станочных механизмов реализующих эти алгоритмы, а также фрактального метода управления.

Автором разработаны новые кинематические схемы и реализующие их конструкции [1...10] основанные на принципе вращения инструмента относительно пересекающихся под острым углом или параллельных осей рис.1.

С помощью указанных схем возможна высокоскоростная обработка следующих типов поверхностей:

- плоскостей [5];
- цилиндрических криволинейных [2, 3];
- линейчатых с переменным углом образующей [3, 4];
- криволинейных количественных [6, 7],
- сферических [10];
- двойной кривизны [8].

Для примера рассмотрим способ и конструкцию фрезерной головки для двухкоординатной обработки деталей с криволинейными коническими поверхностями.

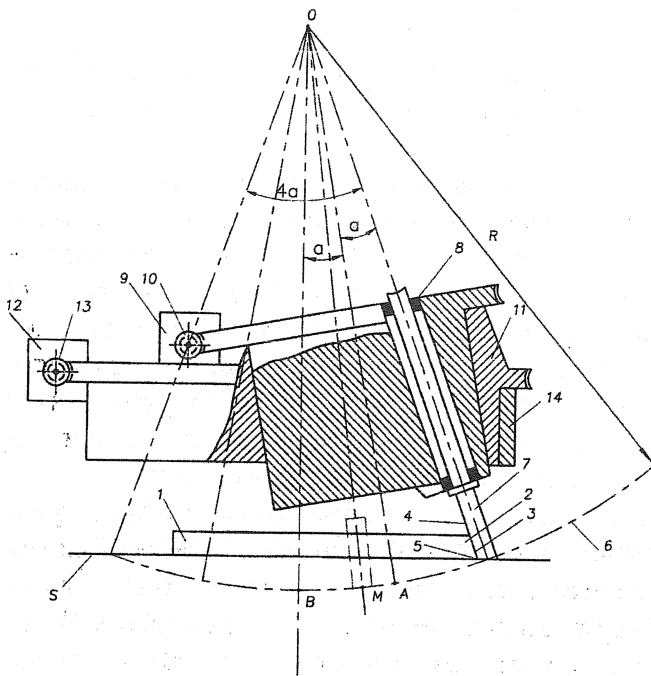


Рис. 2. Фрезерная головка для двухкоординатной обработки конической поверхности

Двухкоординатная обработка деталей с криволинейными коническими поверхностями. Точную обработку плоских деталей с коническими поверхностями при минимальном объеме математической подготовки обеспечивает схема обработки с вращением оси инструмента относительно двух расположенных под углом осей, пересекающихся в вершине конической поверхности рис. 2.

Деталь 1, например, носовая часть стабилизатора самолета, обрабатывается по поверхности 2, являющейся частью сложной конической поверхности 3. Поверхность 3 получена движением прямой образующей 4, проходящей через вершину O и последовательно перемещающейся через все точки направляющего контура 5, являющегося линией пересечения поверхности 3 с плоскостью S детали. Обработку ведут вращающимся цилиндрическим инструментом 7, длину которого выбирают больше толщины детали 1, вдоль образующей 4.

В процессе обработки инструмент 7 осуществляет управляемый поворот с постоянным углом  $\alpha$  наклона относительно геометрической оси АО, который обеспечивается установкой шпинделя в цилиндрической опоре 8, вращаемой управляемым по программе приводом 9 с червячной передачей 10. Ось АО управляемых поворотов независимо от поворота опоры 8 поворачивают с постоянным углом наклона  $\alpha$  относительно другой геометрической оси ВО, установив опору 8 в цилиндрическую опору 11, вращаемую по программе приводом 12 через червячную передачу 13 относительно корпуса станка 14. Оси ОА и ОВ пересекаются в вершине О обрабатываемой конической поверхности, через которую проходит образующая 4. Таким образом, инструмент во время обработки поворачивают вокруг двух осей.

Сложением поворота опоры 8 относительно опоры 11 с поворотом опоры 11 относительно корпуса 14 обеспечивается расположение торца фрезы в любой точке, лежащей на сферической поверхности 6 радиуса R в пределах телесного угла  $4\alpha$ , причем направление режущей кромки в любой точке М всегда совпадает с направлением образующей любой конической поверхности, направляющий контур которой расположен внутри кругового конуса с телесным углом при вершине  $4\alpha$ .

Таким образом, достигается обработка конической поверхности с совпадением режущей кромки и образующей при минимальном количестве управляемых координат оборудования, равном двум. Факторами, обеспечивающими существенное повышение точности в этом способе, являются:

- аппроксимация реального контура кривыми линиями вместо прямых, так как сложное движение фрезы осуществляется как сумма простых круговых перемещений относительно осей АО и ВО;
- возможность обработки по всему контуру при однонаправленном вращении относительно осей АО и ВО, чем исключаются погрешности, вызванные жесткостью системы СПИД.

УП по новым схемам ВСФ разрабатываются на базе системы Delcam [11], специализирующейся на разработке компьютерных технологий, обеспечивающих моделирование и механообработку сложных поверхностей. В частности, в PowerMILL - системе многокоординатной обработки - реализован специальный набор средств генерации траекторий для ВСФ, модуль оптимизации УП (автоматическое изменение подачи в зависимости от количества снимаемого материала с целью оптимизации нагрузки на режущий инструмент), имеется возможность ручного редактирования траектории обработки. Положительным является и факт внедрения этой системы на ряде отечественных предприятий и ее интеграция практически со всеми существующими на сегодня CAD/CAM системами.

Известно, что для облегчения разработки управляющей программы может быть предложен такой прогрессивный метод изготовления деталей, как «компьютерная технология реверсивного проектирования», которая включает следующие этапы: идея - макет - изделие. На объемных сканерах, контрольно-измерительных машинах, или на станках с ЧПУ, оснащенных измерительными оптическими головками, производится оцифровка макета. Таким образом, получается электронный макет изделия, представленный в виде упорядоченного или неупорядоченного массива точек в пространстве. На этапе реверсивного проектирования происходит преобразование сканированных точек в данные, которые воспринимаются системами компьютерного проектирования. Далее процесс изготовления изделия идет по традиционному пути.

Описанная выше аппаратная модернизация позволяет, в свою очередь, использовать новые методы интерполяции траекторий обработки, поскольку классический (отрезками прямых) в десятки раз снижает реальную производительность станка.

Таким образом, предлагаемое аппаратно-программное обеспечение процесса ВСФ деталей летательных аппаратов, наряду с использованием разработанных новых технологических приемов применения инструмента и его оптимальных траекторий, позволило существенно повысить производительность при ВСФ, обеспечивая при этом высокое качество и точность обработанных поверхностей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологическое обеспечение аэродинамических обводов современного самолета. Иванов Ю.Л., Кабалдин Ю.Г., Кузьмин В.Ф. и др. -М.: Машиностроение-1, 2001. С. 284-351.
2. Фрезерная головка. Кузьмин В.Ф. А.с. 812446 СССР МКИ В 23 С 3/00. Заявка № 2769875. Заявл. 28.06.79. Бюл. № 10.
3. Фрезерная головка. Кузьмин В.Ф., Кузьмина Л.Н. А.с. 931326 СССР МКИ В 23 С 3/16. Заявка № 2730510. Заявл. 01.03.79. Бюл. № 20.
4. Способ обработки криволинейных поверхностей. Кузьмин В.Ф. А.с. 931328 СССР МКИ В 23 С 3/16. Заявка № 2817744. Заявл. 26.06.79. Бюл. № 20.
5. Способ обработки плоскостей. Кузьмин В.Ф. А.с. 1161278 СССР МКИ В 23 С 3/00. Заявка № 3684944/25-08. Заявл. 04.01.84. Оpubл. 15.06.85. Бюл. № 22.
6. Способ обработки сложных конических поверхностей. Кузьмин В.Ф. А.с. 1338221 СССР МКИ В 23 С 3/16. Заявка № 4020119. Заявл. 19.12.85.
7. Способ обработки сложных конических поверхностей. Кузьмин В.Ф. А.с. 1408634 СССР МКИ В 23 С 3/16. Заявка № 4129049. Заявл. 08.10.86
8. Способ обработки сложных поверхностей. Кузьмин В.Ф. А.с. 1439862 СССР МКИ В 23 С 3/16. Заявка № 4249288. Заявл. 01.04.87.
9. Способ обработки деталей с криволинейными поверхностями. Кузьмин В.Ф. и др. Патент 2169643 РФ МКИ С2 7 В 23 С 3/16. Заявка № 99121978/02. Бюл. № 18
10. Способ обработки сферической поверхности детали. Кузьмин В.Ф. и др. Патент 2170649 РФ МКИ С2 7 В 23 С 3/16. Заявка № 99121981/02. Заявл. 15.12.99. Бюл. №20
11. Delcam на просторах России и стран СНГ //САПР и графика. 1999. №11.-С. 78-84.

Комсомольское-на Амуре авиационное производственное объединение

УДК 621.9.011

С.И.ПЕТРУШИН

#### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И ЗАВИВАНИЯ СЛИВНОЙ СТРУЖКИ ПРИ НЕСВОБОДНОМ РЕЗАНИИ

Предложены и рассмотрены две схемы образования сливной стружки при несвободном резании криволинейным лезвием с плоской передней поверхностью: с единственной условной поверхностью сдвига и с развитыми зонами пластических деформаций. Приведены аналитические зависимости, описывающие геометрию и кинематику несвободного резания, а также напряженно - деформированное состояние зоны стружкообразования. Показана возможность применения полученных закономерностей для решения задачи описания процесса завивания сливной стружки.

Тенденция приближения формы и размеров заготовок к форме и размерам деталей машин приводит к смещению основной сферы применения обработки резанием в область