

- сборных режущих инструментов на основе сетевых граф-моделей. // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. 2009, № 2. с. 28-30.
- Лукина С.В., Крутякова М.В, Соловьева Н.П. Обеспечение конкурентоспособности металлорежущего оборудования путем управления его качеством и себестоимостью на этапах НИОКР (на примере токарных станков). М.: МГТУ «МАМИ», 2011, 108 с.
 - Лукина С.В. Автоматизация процедур формирования и выбора структурных компоновок сборных режущих инструментов на этапе технической подготовки производства. // *Вестник саратовского государственного технического университета*, 2011, Т. 3, с. 241-247.
 - Иванников С.Н., Шандов М.М. Метод определения параметрической надежности шпindelных узлов. // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2012, № 1(13), с. 160-162.
 - Иванников С.Н. Проблемы обеспечения качества и надежности технологического оборудования в автотракторостроении. // *Успехи современного естествознания*. 2009, № 9. с. 73.

Повышение эффективности многокоординатного фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ

д.т.н. проф. Лукина С.В., Манаенков И.В.
МГТУ «СТАНКИН», Университет машиностроения
(495) 223-05-23, доб. 1451, lukina_sv@mail.ru, manaenkov_igor@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности многокоординатного фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ. Произведена визуализация обработки пространственно-сложной поверхности в CAD/CAM/CAE/DDM-системе SolidWorks/

Ключевые слова: многокоординатное фрезерование, пространственно-сложная поверхность, 3D-геометрический образ.

Современное состояние и перспективы развития технического прогресса характеризуются использованием в машинах и механизмах различного целевого назначения деталей с криволинейными пространственно-сложными поверхностями. К ним относятся лопатки паровых и газовых турбин, крыльчатки, гребные и воздушные винты, импеллеры, экструдеры и т.п. (рисунок 1). Применение деталей с рабочими поверхностями сложной формы позволяет расширить функциональные, технологические и эксплуатационные возможности машин и повысить качество обработанных изделий.

Производство деталей с пространственно криволинейными поверхностями отличается технологической сложностью, трудоемкостью и высокой долей ручных доводочных операций. Механическая обработка деталей с криволинейными пространственно сложными поверхностями осуществляется на мехатронном металлообрабатывающем оборудовании, состоящем из конструктивно объединенных подсистем с четырьмя и более одновременно управляемыми от системы ЧПУ координатами [1].

Техническая подготовка производства криволинейных пространственно-сложных поверхностей основана на использовании автоматизированных систем конструирования и изготовления – систем класса CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Machining) и выше.

Многокоординатная обработка деталей с криволинейными пространственно-сложными поверхностями характеризуется выраженной нестационарностью ее основных параметров, а именно параметров удаляемого припуска и сечений срезаемых слоев, допустимыми в текущий момент времени критическими значениями скорости резания, подачи и т.д., обусловленных динамикой текущих значений кинематических геометрических параметров режущих кромок инструментов. Это является причиной возникновения погрешностей формы, размеров и взаимного расположения обработанных поверхностей.

Эффективность изготовления высокотехнологичных деталей зависит от технических

возможностей станочного оборудования, средств технической подготовки производства и способов управления процессом формообразования на станке.



Рисунок 1 – Сложнопрофильные детали различного целевого назначения

Повышение эффективности изготовления деталей с криволинейными пространственно-сложными поверхностями возможно путем расширения функциональных возможностей компьютерных средств САМ-моделирования на основе оптимизации траекторной задачи формообразования, позволяющей обоснованно назначить параметры траектории и обработки по совокупности заданных критериев, и более полного использования потенциальных возможностей рабочего пространства многокоординатных станков с ЧПУ.

Решение данной задачи предусматривает разработку математической модели многокоординатной обработки, обоснование критериев оптимизации, определяющих кинематические и эксплуатационные параметры операции, обоснование методов решения математической модели с учетом всего многообразия изменяющихся факторов процесса обработки.

В качестве критериев оценки эффективности предложено рассматривать погрешность обработки, время на операцию многокоординатного фрезерования и стоимость обеспечения заданного уровня точности обработки.

Прогрессивным способом обеспечения точности многокоординатных станков с механической кинематикой является компенсация геометрических и кинематических погрешностей механизмов за счет их учета в алгоритмах программного управления. Этот подход связан с наименьшими затратами, так как реализуется полностью программными средствами, не требуя конструктивных изменений или модернизации оборудования, а также является наиболее гибким, поскольку улучшение характеристик оборудования, уже находящегося в эксплуатации, сводится к совершенствованию математического аппарата и к доработке программного обеспечения системы управления. Периодическая корректировка параметров кинематических моделей, используемых в алгоритмах управления, позволяет учитывать износ и накапливаемые в процессе эксплуатации геометрические отклонения отдельных кинематических пар.

Корректировка параметров кинематических моделей возможна на основании оценки погрешности контурной обработки через разность радиус-векторов фактического положения точки кривой контакта локальных систем координат, связанных с режущим инструментом и

обрабатываемой поверхностью, и заданных соотношением:

$$\{\delta\} = \left| \{r_\phi\} - \{r_3\} \right| \quad (1)$$

Для дальнейшего анализа величина погрешности обработки $\{\delta\}$ была представлена в виде суммы составляющих, образующихся в результате проявления погрешностей размерных цепей, отклонений форм и положений поверхностей элементов технологической системы $\{\delta_{s1}\}$ [2-4]; и в результате проявления возмущений от собственных и контактных деформаций и явлений теплопереноса в элементах технологической системы $\{\delta_{s2}\}$:

$$\{\delta\} = \{\delta_{s1}\} + \{\delta_{s2}\} \quad (2)$$

Для идентификации составляющих погрешностей необходимо оперировать комплексом следующих понятий: ось, плоскость или объем; непрямолинейность оси; координаты точек; попарно взаимная неперпендикулярность плоскостей (осей). Обычно для проверки точности станка в производственных условиях используют обработку и измерение контрольных изделий-образцов, определяя суммарную погрешность положения инструмента относительно изделия. Результаты такой проверки, проводимой, как правило, на небольшом или единичном количестве образцов, нельзя распространить на комплекс разнородных обрабатываемых пространственно сложных поверхностей. Следовательно, единичные проверочные эксперименты не позволяют оценить составляющие суммарной погрешности обработки и случайные погрешности.

Точность многокоординатных станков зависит от многих факторов, причем решающее влияние на точность оказывают как отклонения при позиционировании по отдельным осям, так и их совместная синергетическая интеграция. Влияние этих отклонений на точность обработки имеет сложную зависимость и определяется характером кинематических связей процесса одновременного позиционирования по многим координатам с учетом интерполяционной процедуры управления движениями узлов станка.

Составляющая погрешности от проявления возмущений собственных и контактных деформаций элементов технологической системы $\{\delta_{s2}\}$ наиболее наглядно определяется отклонением траектории движения инструмента от заданного контура поверхности, которое может быть представлено отклонением положения оси инструмента и отклонением положения вершины режущей кромки инструмента. Как правило, отклонение положения вершины режущей кромки инструмента компенсируется юстировкой станка при его статической наладке, а отклонение положения оси инструмента может быть скорректировано только управляющей программой ЧПУ, обеспечением постоянства снимаемого слоя в точке касания инструментальной поверхности с поверхностью заготовки.

Время на операцию многокоординатного фрезерования в общем случае является функцией траектории движения режущего инструмента l_Σ и режима резания:

$$T = f(l_\Sigma, l_1, s_z, t, v, n) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где: l_1 – длина рабочей части инструмента; s_z – подача на зуб; t – глубина резания; v – скорость резания; n – количество проходов.

Стоимость обеспечения заданного уровня точности обработки предложено оценивать по укрупненному показателю переменной составляющей технологической себестоимости операции:

$$C = \frac{C_o}{F_d} \cdot T \rightarrow \min. \quad (4)$$

Здесь C_o – составляющая затрат, зависящая от выходной точности станочного оборудования; F_d – действительный годовой фонд времени работы станочного оборудования.

Для визуализации процесса обработки пространственно сложной детали на станке с ЧПУ использовалась CAD/CAM/CAE/PDM-система SolidWorks. Комплексные программные

решения SolidWorks базируются на передовых технологиях гибридного параметрического моделирования, интегрированных средствах электронного документооборота SWR-PDM и SWR-Workflow, а также на широком спектре специализированных модулей.

В качестве прототипа использовался вертикальный обрабатывающий центр с ЧПУ модели «TMV-850A» производства фирмы «TOPPER», дополнительно оснащенный поворотной головкой Golden Sun CNC 251 RB. Для формирования 3D-геометрического образа был произведен синтез всех сборочных элементов станка, с подробной детализацией присоединительных, посадочных и установочных поверхностей. Для обеспечения возможности вариантного проектирования была предусмотрена параметризация всех сборочных элементов станка. Сборка геометрических образов элементов станка была произведена с проверкой интерференции присоединительных поверхностей элементов и ее корректировкой. Сформированный 3D-геометрический образ обрабатывающего центра модели «TMV-850A» приведен на рисунке 2.

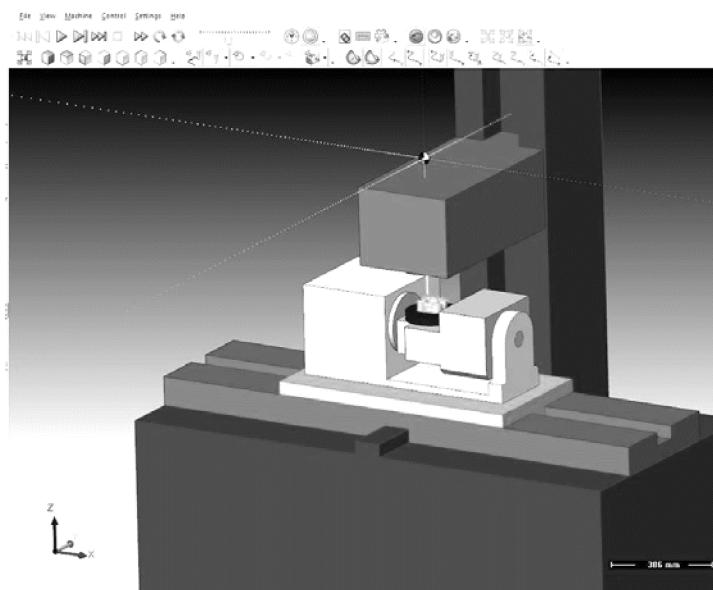


Рисунок 2 – 3D-геометрический образ обрабатывающего центра модели «TMV-850A» фирмы «TOPPER»

В качестве примера пространственно сложной поверхности использовалась деталь с множеством внутренних карманов переменного профиля, формируемая из призматической заготовки (рисунок 3).

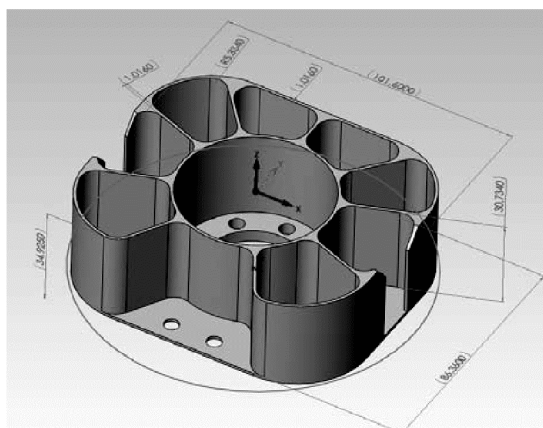


Рисунок 3 – 3D-геометрический образ обработанной пространственно сложной поверхности (обрабатываемый материал силумин, объем снимаемого материала – 304 800 мм³)

Кинематика формообразующего движения была симулирована программой MashSim adapt, позволяющей произвести полную визуализацию обработки и отследить корректность формирования управляющей программы для достижения заданных параметров обработки.

Направленное формирование оптимальной траектории инструмента осуществлялось коррекцией управляющей программы через API-макросы.

Результаты расчета параметров обработки представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета

Переход	Глубина обработки, мм	Диапазон подачи, мм/мин	Диапазон оборотов, об/мин	Время обработки, мин
iMachining (наружная обдирка с припуском 0.5)	34	942 – 1 433	3 692 – 5 617	0:02:49
iMachining (наружная чистовая)	34	592 – 1 433	3 281	0:00:38
iMachining (сквозные отверстия с припуском 0.5)	34	508 – 1 433	3 810 – 5 617	0:05:48
iMachining (сквозные отверстия чистовая)	34	592 – 1 433	3 281	0:00:16
Контурная	-	1 718	4 775	0:00:31
iMachining (все карманы с припуском 0.5)	30	508 – 6 758	3 498 – 6 054	0:07:52
iMachining (все карманы чистовая)	30 мм	590 – 6 758	3 275 – 6 054	0:01:37
Параллельные проходы: линейная	-	1 718	4 775	0:00:08
Общее время обработки				0:19:38

В результате проведенных теоретических и прикладных исследований сформирована математическая модель многокоординатной обработки для выбора оптимального сочетания параметров управления процессом с точки зрения принятой системы критериев оптимальности.

Сформированные 3D-геометрические образы элементов технологической системы многокоординатного фрезерования позволили обосновать выбор параметров управления процессом многокоординатной обработки; разработать алгоритм и расчетные программы корректировки погрешности обработки 3D-среду имитационного моделирования.

Работа выполнена в рамках проекта «Определение пространственной точности металлорежущих станков и разработка методов ее обеспечения» (Государственный контракт № 16.740.11.0439 от 26 ноября 2010 г).

Литература

1. Макаров В.М. Многокоординатная или многоповерхностная металлообработка. Ритм, 2010, № 52, с. 32-35.
2. Максимов Ю.В., Абрамова А.Р., Кузьминский Д.Л., Мокринская А.Ю. К вопросу об обеспечении качества обработки сложнопрофильных деталей на станках с изменяющимися элементами. // Известия МГТУ «МАМИ». 2012, № 1(13), с. 168-174.
3. Анкин А.В., Кузьминский Д.Л. Разработка программного обеспечения для расчета пространственной размерной цепи. // Известия МГТУ «МАМИ». 2011, № 2(12), с. 106-110.
4. Максимов А.Д., Сорокин Ю.А. Принципы алгоритмизации выбора баз механической обработки. // Известия МГТУ «МАМИ». 2010, № 1(9), с. 116-119.