

УДК 621.9.06-529:621.914.1-185.4

Е.В. КОМБАРОВА, Р.В. ВАРНАС

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОРГАНОВ СТАНКА С ЧПУ

В области механообработки чрезвычайно перспективным является применение технологии высокоскоростного фрезерования (ВСФ). С целью определения возможности реализации ВСФ на модернизированном оборудовании разработана система регистрации параметров движения органов станка. Система регистрации функционирует в составе системы ЧПУ (СЧПУ), что позволяет проводить исследования в процессе реальной обработки деталей. Проведены исследования процесса обработки руля аэродинамической модели из закаленной стали. Применение системы регистрации параметров движения позволило сопоставить возникшие дефекты обработанной поверхности с изменением кинематических параметров движения органов станка. Экспериментально проверено влияние сопряжения линейных участков управляющей программы дугами окружности и сплайн кривыми на точность позиционирования органов станка. Показана принципиальная возможность обработки закаленных материалов на модернизированном оборудовании с точностью позиционирования до 14 мкм на подаче до 2160 мм/мин.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, СЧПУ, точность позиционирования, ошибка по положению.

Введение

Необходимость сокращения затрат времени и сроков выпуска авиационной техники требует применения современных технологий производства. В области механообработки это, несомненно, применение высокоскоростной обработки и высокоскоростного фрезерования (ВСФ), в частности [1, 2]. Высокая стоимость оборудования, особенно в условиях экономического кризиса, является основным сдерживающим фактором внедрения ВСФ на промышленных предприятиях. Основная часть станочного парка с ЧПУ большинства предприятий была сформирована в конце 80-х, начале 90-х годов XX столетия. Скорости резания и, соответственно, производительность процесса обработки, для которых проектировалось это оборудование, были значительно ниже соответствующих параметров современных станков. Максимальные скорости перемещения у старых моделей станков 2500...5000 мм/мин против 20000...40000 мм/мин у современных моделей. Тем не менее, технологическая подача, необходимая для реализации ВСФ, в зависимости от обрабатываемого материала и диаметра режущего инструмента может составлять 600...3500 мм/мин [3]. Очевидно, существует некоторое перекрытие между максимальными подачами, реализуемыми на старом оборудовании и подачами, необходимыми для реализации современного процесса высокоскоростного фрезерования. Соответственно возникает вопрос:

насколько возможно использовать режимы высокоскоростного фрезерования на устаревшем оборудовании?

Из огромного списка условий, которые необходимо выполнить для реализации технологии ВСФ, приведенных в различных публикациях [1, 4, 5, 6], можно выделить требования обеспечения высокой точности позиционирования и плавности движения органов станка. Особенностью реализации ВСФ является то, что большая часть тепла, выделяемого в процессе резания (от 75 до 95%), уходит со стружкой [4, 7]. Поэтому стружка при ВСФ выполняет функцию отвода тепла. Обработка всегда должна вестись с образованием стружки. Замедление подачи ниже определенного значения приводит к уменьшению образования стружки, перегреву инструмента и, как следствие, к его преждевременному выходу из строя. Несомненно, что завышение подачи приводит к увеличению нагрузки на инструмент и, как следствие, к его повышенному износу или поломке. Таким образом, при ВСФ точность поддержания заданной скорости движения и точность позиционирования органов станка имеет решающее значение.

В процессе фрезерования инструмент перемещается по криволинейной траектории с постоянным изменением направления вектора контурной скорости движения (F). Движение органов станка осуществляется со скоростью равной проекции вектора F на ось координат, соответствующую органу станка.

$$F_x = F * \cos(\alpha_x(t)),$$

$$F_y = F * \cos(\alpha_y(t)),$$

$$F_c = F * \cos(\alpha_c(t)),$$

где $\alpha_x(t), \alpha_y(t), \dots, \alpha_c(t)$ – пространственный угол в n-мерном пространстве между вектором контурной скорости F и соответствующей осью станка.

Из-за постоянного изменения направления вектора контурной скорости каждый в отдельности орган станка работает в условиях неустановившегося движения. При реализации такого движения динамические характеристики органа станка определяют точность позиционирования и отработки заданной скорости движения. Можно предположить, что именно большие динамические погрешности позиционирования являются основным ограничивающим фактором, препятствующим применению технологии ВСФ на старых моделях станков.

С целью обеспечения анализа процесса движения органов станка авторы статьи поставили задачу создания программно-аппаратного комплекса сбора объективных данных о кинематических параметрах движения органов станка при обработке деталей на оборудовании с ЧПУ.

1. Разработка системы регистрации параметров и проведение экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проведены на станке модели MA655 (1990 года выпуска) с СЧПУ на базе персонального компьютера. Станок, на котором проводились экспериментальные исследования, эксплуатируется с электродвигателями и тиристорными электроприводами, установленными заводом изготовителем. Измерение положения ор-

ганов станка в СЧПУ осуществляется с помощью оптических датчиков типа BE178. Данные от датчиков положения поступают в компьютер СЧПУ через устройство согласования. СЧПУ обеспечивает измерение положения с достаточно высокой точностью, одна дискрета датчика соответствует перемещению органа станка на 0,0008 мм. Компьютер СЧПУ оснащен 128 Mb оперативной памяти и 2 Gb постоянной памяти. Наличие в СЧПУ надежной системы измерения положения и достаточных вычислительных ресурсов персонального компьютера, позволило использовать аппаратные средства СЧПУ для создания системы регистрации кинематических параметров движения органов станка.

Упрощенная схема взаимодействия разработанной системы регистрации с СЧПУ приведена на рис. 1.

Разработанный комплекс программного обеспечения состоит из двух частей:

- подсистемы регистрации параметров;
- подсистемы визуализации и анализа.

Подсистема регистрации параметров функционирует как часть программного обеспечения СЧПУ и обеспечивает возможность сохранения данных о расчетных и фактических параметрах движения органов станка в каждом такте управления. Режим регистрации данных инициализируется командой с пульта оператора ЧПУ. Интервал времени непрерывной регистрации данных составляет до 10 минут.

Подсистема визуализации и анализа выполнена в виде приложения, работающего в операционной системе Windows XP.

Исследование движения органов станка проведено в процессе изготовления руля управления аэродинамической модели (рис. 2).

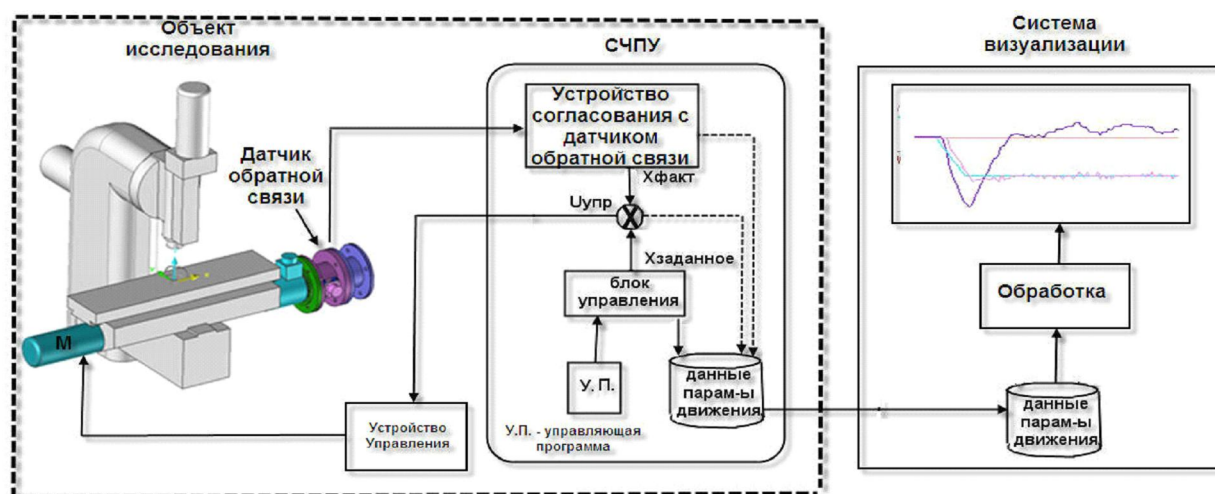


Рис. 1. Схема взаимодействия систем регистрации кинематических параметров движения с СЧПУ

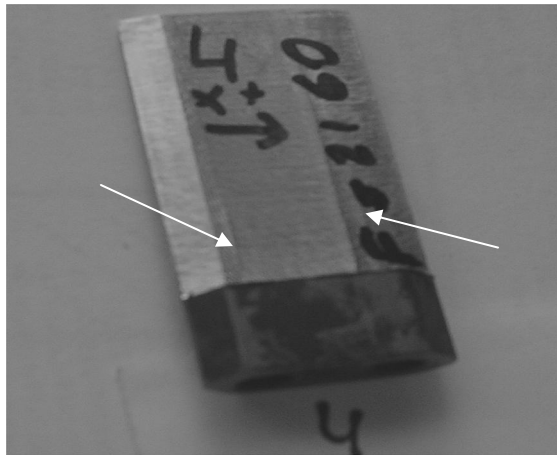


Рис. 2. Руль управления аэродинамической модели (дефект поверхности отмечен стрелками)

Обработка образцов №4, №5, №6 выполнена сразу в окончательный размер без разделения на черновые, чистовые проходы на подаче: $F=2160$ мм/мин (№4), 1800 мм/мин (№5), 1500 мм/мин (№6). Заготовка выполнена из стали 30ХГСА, закаленной до твердости 48 HRC_Э. Глубина резания составляла 0.2 мм. Ширина резания соответствовала 2.5...3 мм.

Геометрические размеры полученных образцов полностью удовлетворяют требованиям документации. Допуск на толщину профиля 30 мкм, фактическое отклонение по толщине не превысило 30 мкм. Однако на всех образцах на боковой поверхности наблюдался дефект неплоскостности. В наибольшей степени дефект неплоскостности проявился на образце №4 (рис. 2). Максимальное отклонение толщины профиля образца №4 составило 30 мкм, а отклонение от плоскостности 14 мкм.

Во время выполнения обработки образцов была выполнена регистрация параметров движения органов станка.

2. Анализ результатов эксперимента

Траектория обработки одного слоя приведена на рис. 3. На основном участке траектории со 2-го по 14-й кадр линейные участки сопряжены между собой по дуге окружности, что обеспечивает возможность выполнения программы на максимально возможной контурной подаче без торможения в точках излома траектории.

На рис. 4 показаны графики изменения контурной подачи и кинематических параметров по координатам X, Y, зафиксированные при обработке двух слоев (образец №4). Разгон до заданной контурной подачи $F=2160$ мм/мин осуществляется по S-образному закону на протяжении 2-го, 3-го и начальной части 4-го кадра. Торможение осуществляется на протяжении конца 12-го и всей длине 13-го, 14-го кадра. Таким образом, основная часть поверх-

ности образца в зоне кадров №7, №9, №11 действительно обрабатывалась на подаче равной заданной $F=2160$ мм/мин.

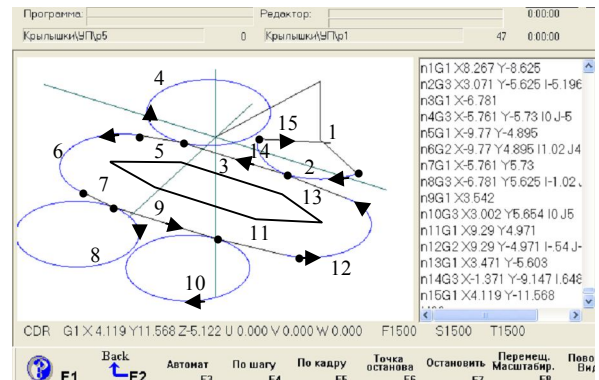


Рис. 3. Управляющая программа и траектория движения инструмента для обработки одного слоя

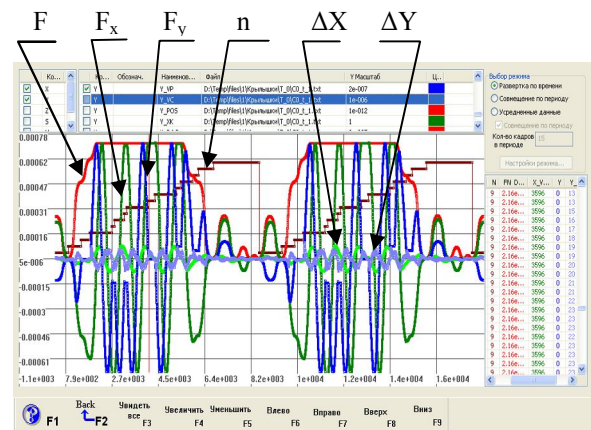


Рис. 4. Графики изменения параметров движения:

- F – контурная подача;
- n – номер выполняемого кадра;
- F_x, F_y – подача по координатам X, Y;
- $\Delta X, \Delta Y$ – рассогласование (погрешность) позиционирования по координатам X, Y

Графики F_x, F_y отображают изменение заданной скорости движения отдельных координат. Графики $\Delta X, \Delta Y$ отображают изменение величины ошибки по положению по соответствующим координатам.

СЧПУ в каждом такте управления рассчитывает необходимую скорость движения на следующий такт. Неточности отработки скорости приводом подач приводят к погрешности позиционирования. График изменения ошибки по положению чрезвычайно информативен. Крутизна наклона графика характеризует отклонение скорости движения, а значение, непосредственно, определяет погрешность позиционирования. Качество движения органов станка оценивается по графику изменения ошибки положения $\Delta X, \Delta Y$.

При анализе характера поведения ошибки по положению ΔY выявлено, что существует соответствие между величинами отклонения и наблюдаемым

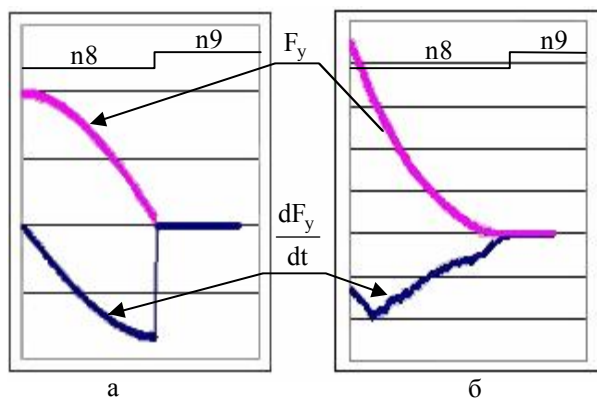


Рис. 7. Изменение подачи и ускорения:
а) переход с радиуса на линейный кадр;
б) переход по сплайн кривой на линейный кадр

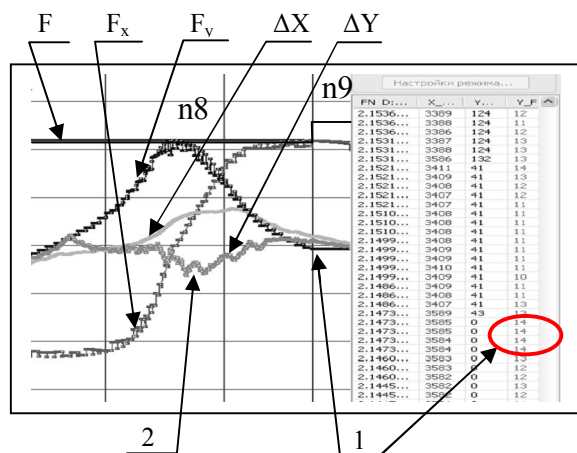


Рис. 8. Изменение параметров движения при переходе к линейному кадру №9 по сплайн кривой:
1 – отсутствует нарастание ΔY в начале кадра №9;
2 – нарастание ΔY при увеличении подачи

Многие авторы публикаций на тему высокоскоростной обработки указывают, что траектории должны быть плавными. Однако чаще всего подразумевается, что сопряжения острых углов должно осуществляться по радиусу [4]. Изредка упоминается, что предпочтительно выполнять сопряжения по кривой [8]. Проведенные исследования показали, что сопряжения линейных участков по сплайн кривой по сравнению с сопряжением по дуге окружности, при прочих равных условиях, позволяет повысить точность обработки почти на 60%.

Нарастание рассогласования на границе сопряжения дуг окружностей и линейных кадров возникает из-за скачка расчетного ускорения, величина которого соответствует центростремительному ускорению движения по дуге окружности. При малых скоростях движения эта величина значительно меньше величины максимального ускорения, развиваемого электродвигателем подачи. При увеличении подачи до величин, необходимых для ВСФ, расчетный скачок ускорения может превысить максималь-

ное ускорение, развиваемое электродвигателем. Величина максимального ускорения, развиваемого двигателем подачи на исследуемом станке, соответствует 0.1g. Современные модели станков оснащаются двигателями подачи позволяющими развивать ускорения до 1.4g [9]. Чем меньше ускорение может развивать привод подачи, тем сильнее будет отрицательное влияние скачков ускорения, задаваемого при расчете траектории инструмента. Соответственно, при реализации режимов ВСФ на старом оборудовании необходимо применять более жесткие требования к качеству сопряжения линейных участков траектории и использовать сопряжения сплайн кривыми, а не дугами окружности.

На рис.4 и 5 отмечена закономерность увеличения ошибки по положению ΔY при увеличении скорости движения органа станка. При анализе данных, полученных при обработке образцов № 4, 5, 6, было установлено, что ошибка положения пропорциональна скорости движения, что свидетельствует о недостаточно хорошей настройке пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора СЧПУ. Хорошая настройка ПИД регулятора СЧПУ должна обеспечивать в среднем нулевое значение ошибки по положению на участках установившегося движения и движении с плавно изменяющейся скоростью.

Заключение

Разработанный авторами программно-аппаратный комплекс позволяет осуществлять сбор объективных данных о кинематических параметрах движения органов станка в процессе обработки деталей.

Проведенные экспериментальные работы по высокоскоростному фрезерованию на станке модели MA655 с СЧПУ на базе персонального компьютера показали, что при технологической подаче 2160 мм/мин обеспечивается хорошая плавность изменения скорости движения органов станка. Достигнута динамическая точность позиционирования порядка 25 мкм, что позволило изготовить образцы соответствующие конструкторской документации.

Точность позиционирования на конкретном станке может быть улучшена за счет более качественной настройки ПИД регулятора СЧПУ.

Применение сопряжения между линейными кадрами управляющей программы в виде сплайн кривых вместо дуг окружностей позволяет увеличить точность позиционирования на конкретном станке до 14 мкм.

Полученные результаты исследования кинематических параметров движения координат станка свидетельствуют о возможности использования технологии ВСФ стальных закаленных деталей на станке типа MA655.

Литература

1. Сергеева Е.В. *Высокоскоростная обработка. Определение, особенности и примеры применения в авиакосмической промышленности [Электронный ресурс]* / Е.В. Сергеева // HSC Consulting – Режим доступа: <http://www.sergeev-hsc.de/>.

2. Потапов В.А. *Проблемы вибраций при высокоскоростном фрезеровании алюминия в авиакосмической промышленности и способы их решения [Электронный ресурс]* / В.А. Потапов // Режим доступа: <http://www.stankoinform.ru>.

3. Качан А.Я. *Технология обработки моноколес высокоскоростным фрезерованием* / А.Я. Качан, С.А. Петров и др. // *Оборудование и инструмент.* – 2006. – № 2 (75). – С. 26-32.

4. *Высокоскоростное фрезерование в современном производстве* / А. Степанов // *CAD/CAM/*

CAE Observer. – 2003. – № 4 (13). – С. 2-8.

5. Аврамов А.А. *Прогнозирование подачи при высокоскоростной механообработке: пер. с англ.* / А.А. Аврамов // *Cutting Tool Engineering.* – 2002. – № 3 (54). – С. 40, 42-44.

6. *Высокоскоростная фрезерная обработка* / Seco Tools // *Мир техники и технологии.* – 2008. – № 12 (85). – С. 28-31.

7. Шмидт Ю. *Механообработка без применения смазочно-охлаждающей жидкости* / Ю. Шмидт, Т. Конольд, М. Дик // *Werkstatt und Betrieb.* – 2001. – № 9. – С. 38, 40, 42, 47-49.

8. Виттингтон К. *Высокоскоростная механообработка* / К. Виттингтон, В. Власов // *САПР и Графика.* – 2002. – № 11. – С. 32-35.

9. Потапов В. *Линейные приводы: экономика и жизнь* / В. Потапов // *ИТОНовости.* – 2001. – № 2. – С. 40-44.

Поступила в редакцию 31.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии производства летательных аппаратов В.С. Кривцов, Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ОРГАНА ВЕРСТАТА З ЧПК

О.В. Комбарова, Р.В. Варнас

В галузі механообробки надзвичайно перспективним є застосування технології високошвидкісного фрезерування (ВШФ). З метою дослідження можливості реалізації ВШФ на модернізованому обладнанні розроблена система реєстрації параметрів руху органів верстату. Система реєстрації функціонує у складі системи ЧПК (СЧПК), що дозволяє провадити дослідження в процесі реальної обробки деталей. Проведені дослідження процесу обробки керма керування аеродинамічної моделі з загартованої сталі. Застосування системи реєстрації параметрів руху дозволило порівняти дефекти, що виникли, на обробленій поверхні зі змінами кінематичних параметрів руху органів верстату. Експеримент довів вплив сполучення лінійних ділянок керуючої програми дугами кола та слайн криві на точність позицій органів верстату. Виявлена принципова можливість обробки загартованих матеріалів на модернізованому обладнанні з точністю позиції органів верстата до 14 мкм на подачу до 2160 мм/хв.

Ключові слова: високошвидкісного фрезерування, СЧПК, точність позиції органів верстату, помилка позиції.

KINEMATIC PARAMETERS OF CNC SYSTEM MACHINE ORGAN ANALYSIS

E.V. Kombarova, R.V. Varnas

Application of high-speed milling (HSM) is very perspective in the machining. System for recording the parameters of machine organs is developed for determination of HSM feasibility on modified equipment. Recording system operates as a component of CNC system that allows to carry out investigations during actual machining of parts. Investigations of machining process for console of aerodynamic model from hardened steel were carried out. Application of recording system of motion parameters allowed to compare revealed defects of machined surface and changes in kinematical parameters of machine organs motions. Influence of mating of control program linear segments by circle arches and spline-curves on positioning accuracy of machine organs were experimentally checked. Principal possibility for machining of hardened steels on the modified equipment with positioning error of up to 14 microns at the feed of up to 2160 mm/min is proved

Key words: high-speed milling (HSM), CNC system, machine organ precision placement, position error.

Комбарова Елена Владимировна – инженер 3 категории кафедры технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kombarenok@mail.ru.

Варнас Радуга Владо – младший научный сотрудник кафедры технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: varnasradu@mail.ru.