

УДК 621.914.1-185.4:621.9.06-529

Р.В. ВАРНАС, В.В. КОМБАРОВ

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

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА МОДЕРНИЗИРОВАННОМ ОБОРУДОВАНИИ С ЧПУ

Необходимость повышения производительности механической обработки определяет потребность применения высокоскоростной обработки (HSC – High Speed Cutting). Высокая стоимость оборудования, реализующего HSC, сдерживает применение этой технологии на отечественных предприятиях, особенно в условиях экономического кризиса. Модернизация существующего оборудования может обеспечить повышение характеристик оборудования до уровня, необходимого для реализации HSC. Авторы провели экспериментальное исследование возможности высокоскоростной обработки на модернизированном станке модели MA655. В процессе эксперимента изготовили управляющие консоли аэродинамической модели. Проведенные исследования подтвердили возможность реализации HSC на модернизированном оборудовании. Для рассмотренного типа станка минимально необходимым объемом модернизации является применение высокоскоростного шпинделя прямого действия и компьютерной системы ЧПУ (СЧПУ).

Ключевые слова: высокоскоростная обработка, HSC, модернизация оборудования с ЧПУ, СЧПУ.

Введение

Обострение конкуренции на высокотехнологических рынках требует от предприятий сокращения сроков и соответственно длительности производственного цикла. В этой связи HSC является чрезвычайно привлекательной для авиационной промышленности [1]. Большое количество публикаций посвящено особенностям нового оборудования, инструмента, систем управления и CAD/CAM систем, которые позволяют реализовывать технологию высокоскоростной обработки [2 – 4]. Однако высокая стоимость оборудования сдерживает применение этой передовой технологии предприятиями. Одним из возможных направлений сокращения затрат может стать модернизация существующего станочного оборудования с ЧПУ [5 – 6]. По оценкам экономистов в США при стоимости станка свыше \$125 000 для предприятия может оказаться выгоднее проведение модернизации, чем покупка нового оборудования [6]. Выполнение глубокой модернизации позволяет в 2 раза увеличить скорости подачи, и в 3 – 4 раза увеличить частоту вращения шпинделя.

Наиболее часто модернизация заключается только в замене системы управления на более современную. Многие предприятия в США производят такую замену приблизительно раз в 5 – 7 лет [6]. На отечественных предприятиях основной парк оборудования с ЧПУ формировался в 80-х годах. Большинство из этих станков по своему техническому состоянию пригодны к эксплуатации. Установка

современной системы управления может повысить технологические возможности станка. В центре САПР и ИТ ХАИ проводятся исследования возможности реализации режимов высокоскоростной обработки на модернизированном оборудовании.

1. Обработка экспериментальных образцов

Исследования проводили на примере изготовления руля управления аэродинамической модели (рис. 1).

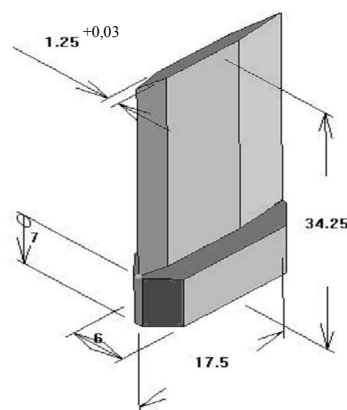


Рис. 1. Аналитический эталон руля управления аэродинамической модели

Деталь имеет толщину 1,25 мм при длине консоли 27 мм. Передняя и задняя кромка профиля выполнены без радиуса закругления. Для обеспечения прочности и жесткости при малой толщине профиля

деталь выполнена из стали 30ХГСА с термообработкой до твердости 45 – 49 HRCэ, $\sigma_b = 1400 – 1600$ МПа. С целью недопущения возможного коробления детали и выгорания острых кромок при термообработке, изготовление руля осуществлялось из заготовки закаленной до требуемой твердости.

Обработку осуществляли на станке модели MA655 1990 г. выпуска. Станок эксплуатировался с электродвигателями постоянного тока и электроприводами типа ЭКЗМ, установленными заводом изготовителем. В качестве СЧПУ использовали компьютерную систему управления, обеспечивающую плавное управление скоростью движения и жесткое следование заданной траектории.

Плавность управления скоростью движения органов станка обеспечивалась за счет применения функции предварительного просмотра траектории (look-ahead), и использования S-образного экспоненциального закона разгона торможения [7]. Функция просмотра траектории автоматически уменьшала рабочую подачу в тех случаях, когда обнаруживалось приближение точки смены направления движения. Использование S-образного экспоненциального закона разгона торможения обеспечивало плавный разгон и плавное торможение, что исключило инерционные забросы по положению в точках останова управляющей программы.

Жесткое следование заданной траектории обеспечивалось за счет применения ПИД (пропорционально интегрально дифференциального) регулятора в СЧПУ. Настройка коэффициентов ПИД регулятора осуществлялась по методике, обеспечивающей рациональные динамические характеристики управляемых координат.

Для проведения эксперимента станок был оснащен скоростным шпинделем, выполненным на базе коллекторного двигателя от фрезерной машины «Makita» для работ по дереву. Мощность шпинделя 1,8 кВт с возможностью регулирования оборотов в диапазоне от 9000 до 23000 об/мин. Инструмент закреплялся с помощью цангового патрона. Посадочное место под цангу выполнено в торце вала шпиндельного двигателя.

Обработка осуществлялась 6-перой концевой твердосплавной фрезой $\varnothing 10$ с углом подъема витка 35° (рис. 2).

Технологические параметры обработки для 4-х образцов приведены в табл. 1.

Для образцов №4, №5, №6 обработка осуществлялась сразу в окончательный размер без разделения на черновые, чистовые проходы. Глубина резания для всех образцов составляла 0,2 мм. Ширина резания соответствовала величине полного припуска и в соответствии с размерами использованной

заготовки составляла 2,5...3 мм. Траектория обработки одного слоя для описываемых образцов, приведенная на рис. 3. Сопряжения линейных участков осуществлялось по дуге окружности, что обеспечивало плавное сопряжение всех участков траектории движения инструмента.

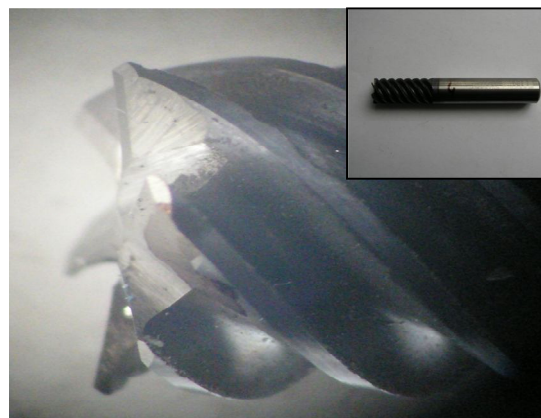


Рис. 2. Концевая твердосплавная фреза.
Состояние зубьев до обработки

Таблица 1
Технологические параметры обработки образцов

	Образец			
	№4	№5	№6	№7
№ инструмента	1	2	3	4
Диаметр инструмента (мм)	10	10	10	10
Скорость резания (м/мин)	283	283	283	283
Глубина резания a_p (мм)	0,2	0,2	0,2	0,2
Ширина резания a_e (мм)	2,5	2,5	2,5	2,0/0,5
Контурная подача F (мм/мин)	2160	1800	1500	2500/ 1200
Подача на зуб F_z (мм)	0,04	0,033	0,0278	0,0463/ 0,022
Удельный съем материала (по технологическому времени) ($\text{см}^3/\text{мин}$)	0,14	0,125	0,12	0,08
Удельный съем материала (по времени резания) ($\text{см}^3/\text{мин}$)	0,41	0,34	0,33	0,23
Тип охлаждения	без охлаждения			
Средняя температура детали после завершения обработки ($^\circ\text{C}$)	38–40			
Максимальное отклонение контролируемого размера ($1,25^{+0,03}$)	+0,03	+0,026	+0,02	+0,015

Плавное сопряжение исключило необходимость замедления подачи на границе кадров и обеспечило возможность выполнения программы с постоянной заданной контурной скоростью и соответственно с постоянной подачей на зуб. При обработке образца №7 в каждом слое осуществлялся черно-

вой и чистовой проход. Ширина резания при черновом проходе составляла 2...2,5 мм, а при чистовом 0,5 мм. Контурная подача составляла для черногового прохода 2500 мм/мин, а для чистового 1200 мм/мин.

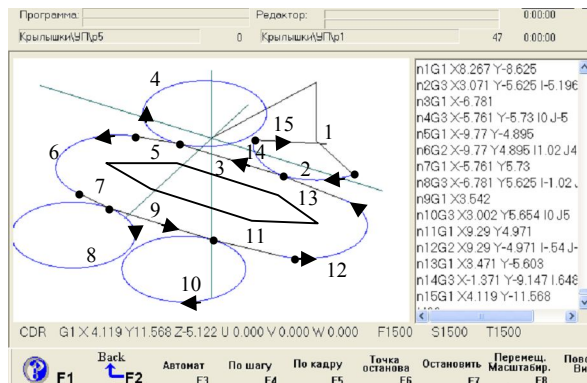


Рис. 3. Траектория обработки одного слоя для образцов № 4, № 5, № 6

2. Анализ результатов обработки

Обработка образцов осуществлялась со скоростью резания 283 м/мин. Полученная скорость резания превысила традиционные скорости резания для материала 30ХГСА и скорость резания, рекомендуемую производителями современного инструмента для HSC, для сталей, закаленных до твердости 50HRC. Температура стружки, судя по цвету свечения искр, составляла 700...800 °С (рис. 4).



Рис. 4. Процесс обработки руля управления аэродинамической модели

Температура детали сразу после завершения обработки не превышала 40 °С. Характеристики процесса обработки свидетельствуют о том, что при

изготовлении образцов реализован режим высокоскоростного фрезерования.

Все изготовленные образцы независимо от режимов обработки соответствовали требованиям конструкторской документации. Толщина изготовленного профиля соответствует допуску контролируемого размера ($1,25^{+0,03}$). Однако на образцах № 4, № 5, № 6 наблюдается неплоскостность отдельных участков поверхности (рис. 5).

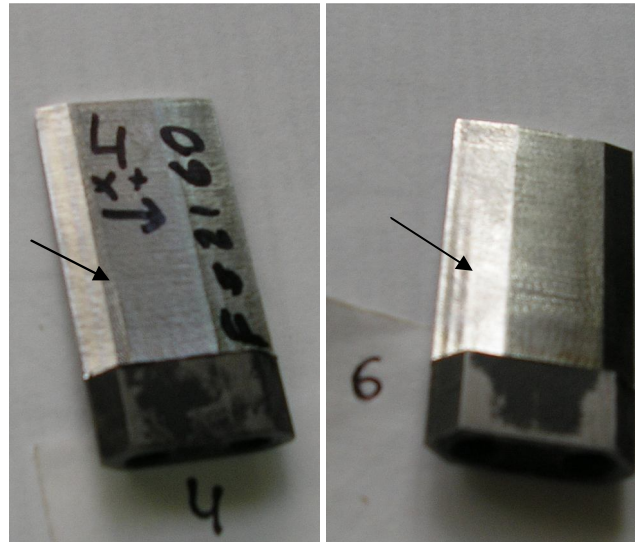


Рис. 5. Неплоскостность поверхности образца № 4 и № 6

Для рассматриваемых образцов величина отклонения не превысила величины максимального отклонения контролируемого размера 30 мкм, но «отблеск» поверхности свидетельствует о систематическом характере причины, которая привела к соответствующему дефекту поверхности. Проведенный обмер образца № 4 показал, что при максимальном отклонении толщины профиля в 30 мкм величина неплоскостности составляет 14 мкм.

На образцах № 4, № 5, № 6 при 28-кратном увеличении выявлены следы ударов фрезы по поверхности детали (рис. 6), которые свидетельствуют о малой жесткости и вибрации шпинделя.

Следы ударов фрезы по поверхности присутствуют и на поверхности образца № 7 (рис. 7), но их глубина значительно меньше глубины следов на образцах № 4, № 5, № 6. Это объясняется меньшей амплитудой колебаний шпинделя, возникающих при выполнении чистового прохода.

Подробное исследование результатов регистрации параметров движения органов станка, произведенное в процессе обработки детали, позволило определить, что причиной выявленного дефекта является динамическая погрешность позиционирования органов станка. Отсутствие дефекта неплоско-

стности поверхности образца № 7 (рис. 7) объясняется значительным уменьшением динамической

погрешности позиционирования при снижении подачи чистового прохода до 1200 мм/мин.

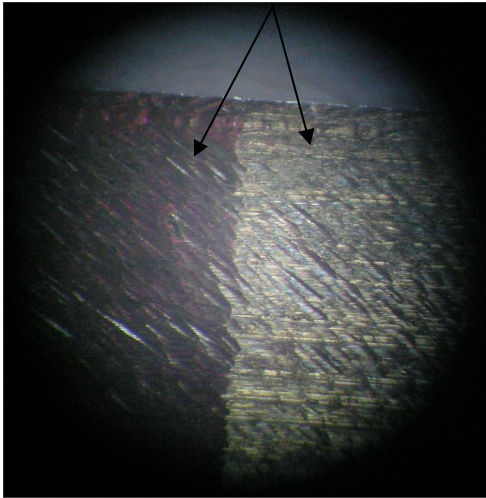


Рис. 6. Следы ударов фрезы по поверхности образца №4

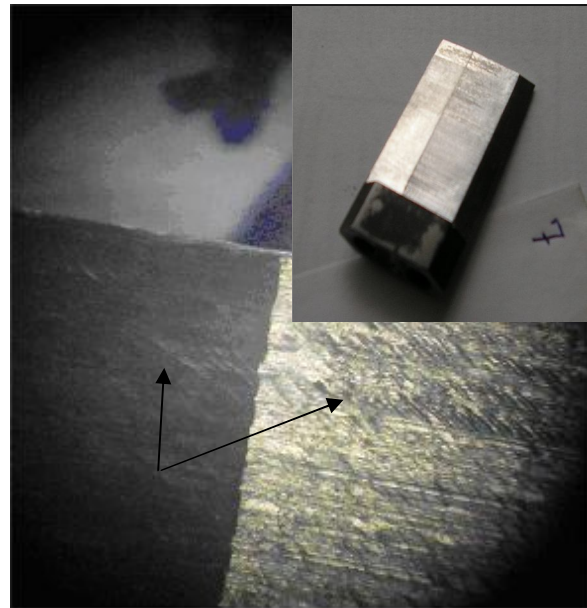
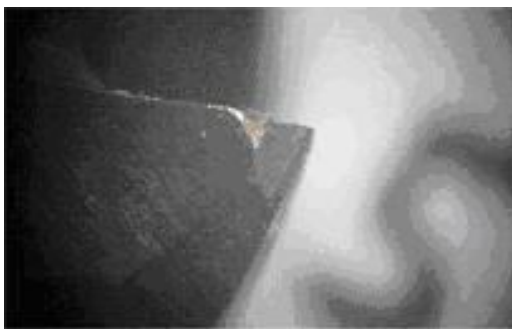
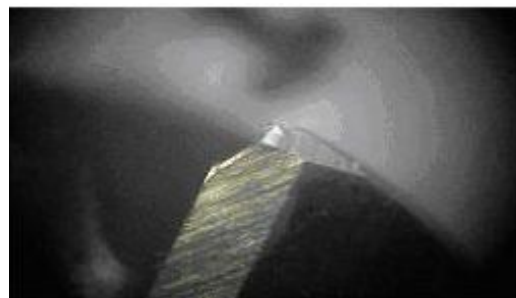


Рис. 7. Внешний вид боковой поверхности и следы ударов фрезы по поверхности образца №7



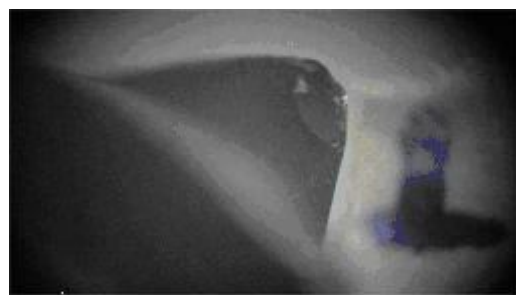
а



б



в



г

Рис. 8. Износ зуба фрезы:

- а – истирание при максимальной подаче на зуб. Фрез № 1, зуб 5 вид с торца;
- б – истирание при максимальной подаче на зуб. Фрез № 1, зуб 5 вид сбоку;
- в – износ при минимальной подаче на зуб. Фрез № 4, зуб 1 вид с торца;
- г – износ при минимальной подаче на зуб. Фрез № 4, зуб 1 вид сбоку

Для оценки производительности произведенной обработки рассчитаны коэффициенты удельного съема материала по технологическому времени и по времени резания. Съем материала по технологическому времени определен как отношение объема снятого материала к общему технологическому времени выполнения программы с учетом времени выполнения вспомогательных функций и холостых проходов по воздуху. Съем материала по времени резания определен как отношение объема снятого материала к времени выполнения непосредственно резания без учета затрат на выполнение технологических операций и холостых проходов по воздуху. По данным публикаций [3] при обработке тестовой детали концевыми фрезами различных фирм производителей была достигнута производительность съема материала порядка $0,8 \dots 1,3 \text{ см}^3/\text{мин}$. Полученная нами производительность съема материала составила $0,3 \dots 0,4 \text{ см}^3/\text{мин}$.

Характер износа режущей кромки инструмента свидетельствует о недостаточной жесткости примененного шпинделя и завышенной скорости резания. Все образцы обрабатывались при одинаковой скорости резания.

Для образцов № 4, № 5, № 6 режим обработки отличался только подачей на зуб.

Для образца № 7 черновой и чистовой проходы выполнялись при одной скорости резания, но с разной подачей на зуб и шириной резания.

При обработке с максимальной подачей на зуб (образец № 4, фрез № 1) наблюдалось истирание зуба (рис. 8, а, б).

При снижении нагрузки на зуб наблюдались сколы режущей кромки. Сколы режущей кромки зуба можно объяснить колебаниями оси шпинделя, при которых режущий зуб выходил из контакта с поверхностью и скалывался при последующем соударении о поверхность.

Максимальное количество сколов наблюдалось на фрезе № 4 при обработке образца № 7 (рис. 8, в, г). Характер закругления режущей кромки свидетельствует о значительном завышении скорости резания для примененного инструмента.

Заключение

Проведенные исследования на станке модели MA655 (1990 г.в.) показали, что замена системы управления на компьютеризированную СЧПУ позволяет производить обработку закаленных сталей

на режимах соответствующих высокоскоростной обработке.

Приводные двигатели, примененные в конструкции станка заводом-изготовителем, вполне пригодны для перемещения на рабочих подачах, необходимых при высокоскоростном фрезеровании закаленных сталей. Алгоритмы управления, примененные в модернизированной СЧПУ, обеспечивают необходимую плавность управления скоростью и жесткость следования заданной траектории. Исползованная система управления позволила получить достаточно высокую точность обработки при рабочих подачах порядка $2500 \text{ мм}/\text{мин}$.

При промышленном использовании модернизируемого оборудования можно рекомендовать, помимо замены системы ЧПУ, осуществлять применение высокоскоростного шпинделя, предназначенного для эксплуатации в металлорежущих станках.

Литература

1. Сергеева Е.В. *Высокоскоростная обработка. Определение, особенности и примеры применения в авиакосмической промышленности* [Электронный ресурс] / Е.В. Сергеева // HSC Consulting – Режим доступа к док.: <http://www.sergeev-hsc.de/>.
2. Степанов А. *Высокоскоростное фрезерование в современном производстве* / А. Степанов // CAD/CAM/CAE Observer. – 2003. – № 4 (13). – С. 2-8.
3. Степанов А. *Высокоскоростное фрезерование в современном производстве* / А. Степанов // CAD/CAM/CAE Observer. – 2004. – № 1 (14). – С. 71-78.
4. Потапов В.А. *Минимум СОЖ и максимум скорости* [Электронный ресурс] / В.А. Потапов. – Режим доступа к док.: <http://www.stankoinform.ru>.
5. Авраамов А.А. *Варианты модернизации токарного оборудования для небольших цехов: американский опыт: пер. с англ.* [Электронный ресурс] / А.А. Авраамов. – Режим доступа к документу: <http://www.stankoinform.ru>.
6. Потапов В.А. *Опыт американских и германских фирм по ремонту, восстановлению и модернизации станочного оборудования* [Электронный ресурс] / В.А. Потапов // Режим доступа к док.: <http://www.stankoinform.ru>.
7. Раисов Ю. *Управление скоростью приводов подач по S-образным законам для систем CNC* / Ю. Раисов, И. Бычков, В. Комбаров // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – № 1 (57). – С. 24-28.

Поступила в редакцию 29.05.2009

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..

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ НА МОДЕРНІЗОВАНОМУ ОБЛАДНАННІ З ЧПК

Р.В. Варнас, В.В. Комбаров

Потреба підвищення продуктивності механічного оброблення окреслює потребу в застосуванні високошвидкісної обробки (HSC – High Speed Cutting). Висока вартість обладнання, яка реалізує HSC, стримує застосування цієї технології на вітчизняних підприємствах, особливо в умовах економічної кризи. Модернізація існуючого обладнання може забезпечити підвищення характеристик обладнання до необхідного рівня для реалізації HSC. Автори здійснили експериментальне дослідження можливості високошвидкісної обробки на модернізованому верстаті моделі MA655. В процесі експерименту виготовили керуючі консолі аеродинамічної моделі. Проведені дослідження підтвердили можливість реалізації HSC на модернізованому обладнанні. Для розглянутого типу верстат мінімально необхідним об'ємом модернізації є застосування високошвидкісного шпинделя прямої дії т комп'ютерної системи ЧПК (СЧПК).

Ключові слова: високошвидкісна обробка, HSC, модернізація обладнання з ЧПК, СЧПК.

USING HIGH SPEED MILLING TECHNOLOGY ON MODERNIZED EQUIPMENT WITH CNC SYSTEM

R. V. Varnas, V. V. Kombarov

Necessity of machining productivity improvement determines requirement for application of using HSC – High Speed Cutting. High cost of HSC equipment holds back the application of this technology in native manufacturing enterprises, especially at conditions of economic crisis. Modernization of existent equipment can provide equipment characteristics increasing up to the level required for HSC realization. Authors carried out experimental investigations of HSC feasibility on the modified machine of MA655 type. Control consoles of aerodynamic model were machined during tests. Experiments confirmed HSC feasibility on modified equipment. For the tested type of machine the minimal volume of modification is application of high-speed spindle of direct action and computer NC system.

Key words: High Speed Cutting, High, HSC, modernization equipment CNC, NC system.

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

Комбаров Владимир Викторович – научный сотрудник кафедры технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kombarov_@mail.ru.