

УДК 621.914.1

Повышение производительности высокоскоростного фрезерования вафельного фона обечаек корпуса ракеты - носителя с использованием инструментальных средств измерения амплитудно - частотных характеристик шпиндельной группы с инструментом

Болсуновский Сергей Анатольевич

sa_bolsunovskiy@mail.ru

Пупчин Владимир Андреевич

doctor.alchin@mail.ru

ЦАГИ, Жуковский, Россия

Аннотация. Рассмотрено применение инструментальных средств измерения амплитудно-частотных характеристик шпиндельной группы с инструментом (шпиндель — зажимное приспособление (оправка) — фреза) обрабатывающего центра с ЧПУ для повышения производительности фрезерования вафельного фона обечаек корпусов ракеты—носителя. Показано, что при обработке обечаек на специализированном станке с ЧПУ повышение производительности может быть достигнуто за счет рационального выбора технологических параметров обработки, обеспечивающих стабильное фрезерование без вибраций. Частота вращения шпинделя определена на основе измерения собственных частот колебаний фрезы с использованием методов модального анализа.

Ключевые слова: оборудование с ЧПУ, высокоскоростное фрезерование, повышение производительности, вибрации при фрезеровании, вибрации инструмента, технологические параметры обработки, устранение вибраций, шпиндельная группа, амплитудно-частотные характеристики

Increasing high - speed milling processing productivity of waffle background on carrier rocket shells using instrumented facility measuring amplitude - frequency response of spindle group and tool

Bolsunovskiy Sergey Anatolievich

sa_bolsunovskiy@mail.ru

Pupchin Vladimir Andreevich

doctor.alchin@mail.ru

The Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Russia

Abstract. Instrumented facility for measurement amplitude-frequency response of spindle group and tool (spindle — tool holder (chuck) — milling tool) of NC machine center for waffle background on carrier rocket shells milling productivity increasing is considered. It is shown that in processing on special NC machine productivity increasing could be achieved by means of rational selection of process parameters providing stable milling with no chatter. Spindle speed was obtained from tool oscillation Eigen frequency calculated by means of modal analysis techniques.

Keywords: *NC machines, high-speed milling, productivity increasing, vibration in milling process, tool chatter, machining process parameters, vibration elimination, spindle group, amplitude-frequency response*

Фрезерная обработка вафельного фона на обечайках (и других конструктивных элементах) корпусов ракеты-носителя составляет существенную часть трудоемкости изготовления изделий космического машиностроения. В применяемой технологии изготовления обечаек фрезеруется цилиндрическая заготовка, полученная гибкой листового проката с последующей сваркой. Фрезерование выполняется на специализированном оборудовании с ЧПУ с высокоскоростным шпинделем и подвижной опорой с обратной стороны фрезеруемой ячейки, которая обеспечивает необходимую поддержку при фрезеровании конструктивного элемента с малой жесткостью и постоянную толщину доньшка в пределах допуска [1, 2].

Ячейка вафельного фона представляет собой карман в материале прямоугольной формы со стороной от 60 до 200 мм и глубиной от 10 до 30 мм, закругления в углах кармана соответствуют радиусу фрезы, радиус между доньшком и стенкой кармана — радиусу скругления торца фрезы. Для одной обечайки число фрезеруемых ячеек составляет несколько сотен, что делает целесообразным повышение производительности фрезерования данного технологического элемента детали. Анализ технологии фрезерования ячейки и управляющей программы показал, что черновая обработка занимает $\frac{3}{4}$ времени, что указывает на целесообразность повышения производительности именно данного этапа обработки. При повышении производительности черновой обработки основными ограничениями будут являться жесткость системы СПИД (станок — приспособление — инструмент — деталь) [3] и динамические характеристики станка с ЧПУ, отражающие его способность вести обработку на выбранной рабочей подаче.

Была рассмотрена частная задача повышения производительности обработки ячейки вафельного фона глубиной 24,5 мм фрезой диаметром 16 мм с округлением торца 3 мм (в соответствии с геометрией ячейки). Черновая обработка такой ячейки выполняется по эквидистантной траектории с врезанием (по спирали или наклонном) в центре ячейки. Объем материала выбирается послойно в несколько переходов.

Опытная эксплуатация станка с ЧПУ и обработка образцов ячеек показала, что выполнение фрезерования возможно с рабочей подачей не более 2000 мм/мин, что является существенным ограничением для повышения производительности высокоскоростного фрезерования, для которого технологическими рекомендациями являются движение инструмента с высокими подачами и обработка с малым съемом материала и малыми усилиями резания [4, 5].

С учетом ограничения на рабочую подачу существенное повышение производительности может быть получено за счет рационального выбора глубины и ширины фрезерования [3]. Для используемой фрезы с радиусом скругления была запрограммирована ширина фрезерования (шаг эквидистанты) 6 мм. Данная рекомендация обусловлена необходимостью обеспечить

отвод стружки с учетом геометрии обечайки, конструкции станка и механизма охлаждения зоны резания. Глубина фрезерования выбиралась так, чтобы выполнить черновую обработку ячейки вафельного фона на глубину 24 мм (припуск на чистовую обработку — 0,5 мм).

Режим обработки в условиях ограничения подачи, для которого удалось выполнить фрезерование ячейки характеризовался следующими технологическими параметрами: ширина фрезерования 6 мм, глубина фрезерования 5 мм, подача 2000 мм/мин. Дальнейшее повышение производительности может быть обеспечено увеличением глубины фрезерования до 6, 8, 12 или до 24 мм за счет сокращения числа переходов при послойной обработке.

Непосредственное увеличение глубины фрезерования с 5 до 6 мм при выбранной частоте вращения шпинделя 9500 об/мин привело к появлению автоколебательных вибраций инструмента [6, 7], что вынудило технолога остановиться на режиме обработки с глубиной фрезерования 5 мм и производительностью 60 см³/мин.

Для устранения вибраций и увеличения глубины фрезерования было предложено выбрать частоту вращения шпинделя, при которой вибрации развиваться не будут. Была применена методика выбора частоты вращения шпинделя [6–8], при которой может быть обеспечено устойчивое фрезерования без вибраций, основанная на определении собственной частоты колебаний (частоты вибраций) шпиндельной группы с инструментом (шпиндель — зажимное приспособление (оправка) — фреза). При этом рекомендуемые частоты вращения шпинделя определяются выражением

$$n_j = \frac{60f_{\text{соб}}}{Z \cdot j}, \quad (*)$$

где $f_{\text{соб}}$ — собственная частота колебаний инструмента, определенная по результатам измерений амплитудно-частотной характеристики; Z — число зубьев фрезы; n_j — рекомендуемая частота вращения шпинделя; $j = 1, 2, 3$.

В ЦАГИ был разработан инструментальный программно-аппаратный комплекс на базе пьезоэлектрического вибропреобразователя (акселерометра) ГлобалТест AP2030-10 и инструментального молотка с пьезоэлектрическим датчиком импульсной силы ГлобалТест AU03 (ф. ГлобалТест, г. Саров), который позволил провести измерения амплитудно-частотной характеристики шпиндельной группы и таким образом определить собственные частоты колебаний.

На рисунке на амплитудно-частотной характеристике виден резонансный пик, который соответствует собственной частоте колебаний фрезы $f_{\text{соб}} \sim 1170$ Гц. При $j = 2$, согласно выражению (*), получим частоту вращения шпинделя 11 700 об/мин.

На практике частоту вращения шпинделя рекомендуется выбирать немного меньшей, чем получается в соответствии с выражением (*). Экспериментальная обработка с понижением частоты вращения шпинделя показала, что наилучший результат достигается при частоте вращения шпинделя 11 300–11 400 об/мин.



Амплитудно-частотная характеристика шпиндельной группы на кончике фрезы

Была выполнена обработка тестовой ячейки с частотой вращения шпинделя 11 300 об/мин и глубиной фрезерования 8 и 9 мм, которая показала отсутствие вибраций для данного сочетания технологических параметров. Достигнутое повышение производительности — с 60 до 96–108 см³/мин.

Список источников

- [1] Болсуновский С.А., Зиняев В.В., Пученков А.Л. Разработка режимов высокопроизводительного фрезерования алюминиевых сплавов применительно к обработке вафельного фона обечайки корпуса ракеты-носителя. *XXII науч.-техн. конф. по аэродинамике: матер. Жуковский, ЦАГИ*, 2010, с. 29–30.
- [2] Вермель В.Д., Болсуновский С.А., Губанов Г.А., Зиняев В.В. Повышение производительности обработки вафельного фона на деталях силового каркаса авиационных конструкций. *Авиационная промышленность*, 2012, № 2, с. 28–32.
- [3] Болсуновский С.А., Вермель В.Д., Губанов Г.А., Качарава И.Н., Леонтьев А.Е. Расчетно-экспериментальная оценка рациональных технологических параметров высокопроизводительной фрезерной обработки в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства аэродинамических моделей самолетов. *Известия Самарского Научного Центра Российской Академии Наук*, 2012, т. 14, № 4 (2), с. 374–379.
- [4] Болсуновский С.А., Вермель В.Д., Губанов Г.А., Зиняев В.В., Ходжаев Ю.Д., Ярошенко С.И. Измерение температуры в зоне резания при высокоскоростном фрезеровании. *Приборы*, 2012, № 1, с. 43–50.
- [5] Болсуновский С.А., Вермель В.Д. Сплайн-аппроксимация траектории инструмента в современных системах управления станков с ЧПУ. *САПР и Графика*, 2009, № 6. URL: <https://sapr.ru/article/20469> (дата обращения 15.06.2025).
- [6] Лазарев Г.С. *Автоколебания при резании металлов*. Москва, Высшая школа, 1971, 243 с.
- [7] Жарков И.Г. *Вибрации при обработке лезвийным инструментом*. Москва, Машиностроение, 1986, 184 с.
- [8] Delio T., Tlustý J., Smith S. Use of Audio Signals for Chatter Detection and Control. *Journal of Engineering for Industry*, 1992, vol. 114, pp. 146–157.