

АППАРАТНОЕ СНИЖЕНИЕ ВИБРОСКОРОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В. М. МЕДУНЕЦКИЙ¹, К. П. ПОМПЕЕВ¹, А. В. РАСЦУПКИН^{1,2}

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

²АО „Завод радиотехнического оборудования“, 192012, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: archijoke@mail.ru

Исследованы параметры режимов резания при тонком фрезеровании сложнопрофильных поверхностей на многоосевых обрабатывающих центрах при изготовлении деталей для изделий космического приборостроения. Приведена взаимозависимость характеристик процесса обработки, оказывающих наибольшее влияние на возникновение паразитирующих вибраций в зоне резания. Отобрана зависимость влияния скорости резания в условиях высокоскоростного фрезерования на параметры вибрационной активности фрезерной системы. Проведены исследования вибрационной активности, возникающей при обработке титанового сплава на фрезерном обрабатывающем центре. Определен коэффициент диссипации энергии виброскорости на основе анализа данных, полученных при использовании виброкомпенсатора в процессе тонкого фрезерования. Выведена зависимость, учитывающая влияние коэффициента потерь при высокоскоростной обработке титановых сплавов с применением демпфирующих элементов. Изложены основные результаты исследований динамических процессов, протекающих при концевом фрезеровании деталей на высоких частотах и влияющих на формирование размерной погрешности обработки.

Ключевые слова: станок с ЧПУ, диссипация энергии, титановые сплавы, фрезерная система, демпферная система

В последние годы широкое применение титановых сплавов в приборостроении способствует предъявлению высоких требований к функциональности, качеству и надежности современной техники. Наряду с этим повышается конструктивная сложность корпусных деталей приборов, узлов и агрегатов высокоточных изделий, в частности, космического приборостроения, а также ужесточаются требования к качественным и размерным характеристикам.

Как правило, обработка элементов сложного профиля производится режущим инструментом, установленным в оправке, при этом инструментальная наладка имеет значительную длину [1]. С усложнением формы обрабатываемых деталей приходится максимально сокращать количество установов для обеспечения заданной точности обработки и снижения временных затрат. Следствием этого является недостаточная жесткость закрепления инструмента и оснастки, что приводит к паразитирующим вибрациям в зоне резания, которые провоцируют возникновение механических дефектов на поверхности заготовки и лезвии инструмента.

Для достижения необходимых параметров точности при тонком фрезеровании сложнопрофильных поверхностей важно учитывать факторы, влияющие на стабильность процесса резания [2]. При выполнении данных операций основным параметром, влияющим на жесткость фрезерной системы в процессе обработки, является значительная длина инструмен-

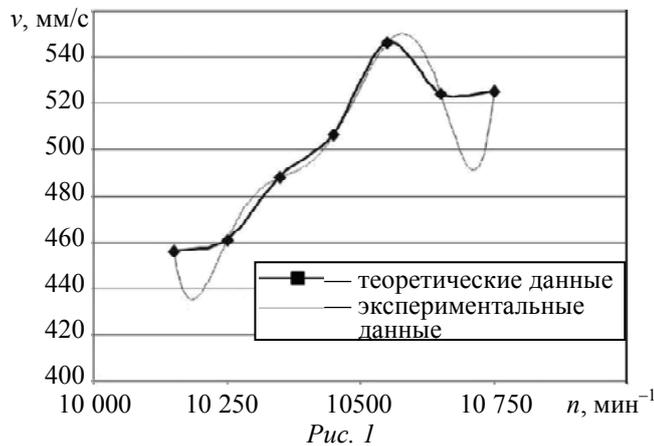
тальной наладки. Как и в любой сложноструктурированной системе, эти показатели взаимозависимы и оказывают влияние на отклонение внешних и внутренних характеристик системы от номинальных значений. Своевременное изменение состояния системы для корректной работы обеспечивается внедрением соответствующих технологий [3]. При этом необходимо учитывать характеристики механической обработки в процессе внедрения технологии, однако корректировать уровень их влияния на колебательные процессы технологической системы при обработке не представляется возможным [4, 5].

На практике закон распространения колебаний фрезерной системы в процессе резания труднообрабатываемых материалов характеризуется виброскоростью v , которую в зависимости от частоты вращения n шпинделя в первом приближении можно определить по формуле

$$v = \frac{k}{\sin(an + b)} + cn + d,$$

где k, a, b, c, d — постоянные коэффициенты.

На рис. 1 приведен график вибрационной активности фрезерной системы в области устойчивого резания, полученный путем теоретического прогнозирования поведения модели, а также графически представлены экспериментальные данные, полученные при тонком фрезеровании титанового сплава ВТ-14 на станке с числовым программным управлением.



Параметры виброскорости и виброускорения являются динамическими, характер их проявления определяется процессами, происходящими в зоне резания непосредственно в точке контакта лезвия инструмента с обрабатываемым материалом [6]. Вибрационная активность обусловлена силами резания, напрямую зависящими от физико-химических процессов, непрерывно изменяющихся в течение цикла обработки. Изменение виброскорости в радиальном направлении вдоль векторов x и y относительно оси вращения z инструмента в зависимости от его геометрических параметров и сил резания можно определить следующим образом:

$$EJ_x(z) \frac{\partial^4 \eta}{\partial z^4} - \rho J_x(z) \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2 \partial t^2} + \rho F(z) \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = P_y(z, t) \delta(z - z_0);$$

$$EJ_y(z) \frac{\partial^4 \varepsilon}{\partial z^4} - \rho J_y(z) \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2 \partial t^2} + \rho F(z) \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} = P_x(z, t) \delta(z - z_0),$$

где E — модуль упругости фрезы, Па; $J(z)$ — момент инерции, м^4 ; ρ — плотность материала $\text{кг}/\text{м}^3$; $F(z)$ — площадь поперечного сечения ступенчатого вала, м^2 ; $P(z)$ — составляющая силы резания, Н; η и ε — коэффициенты потерь в направлении силы резания; $\delta(z - z_0)$ — дельта-функция, смещенная по координате, мм.

При операциях фрезерования сила резания P_{yz} , согласно исследованиям И. Г. Жаркова и нормам режимов резания, определяется по формуле [6]

$$\tilde{P}_{yz} = P_{yz} \cos\left(\frac{\pi n z^*}{30}\right) t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} = P_{yz} \cos(\omega z^*) t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*},$$

где z^* — число зубьев фрезы, ω — угловая скорость, рад/с; q — постоянный коэффициент, t — глубина резания, мм.

Одним из способов уменьшения виброскорости и виброускорения фрезерной системы в зоне резания является демпфирование за счет использования в составе наладки дополнительных конструктивных элементов [7]. Если общая длина наладки от торца шпинделя до крайней точки режущей кромки превышает по размеру 8 диаметров концевой фрезы, рекомендуется производить обработку с использованием антивибрационной оснастки [8, 9]. При изготовлении деталей из труднообрабатываемых материалов, когда диапазон режимов резания ограничен, применение демпферов способствует значительному повышению производительности обработки и обеспечению требуемой точности [10]. При тонком фрезеровании криволинейных поверхностей нежесткой системой рекомендуется использовать люнетный демпфер для гашения колебаний, возникающих в зоне резания [11, 12].

Компанией „Schunk“ (Германия) совместно с АО „Завод радиотехнического оборудования“ (Санкт-Петербург) были проведены эксперименты по обработке направляющего кронштейна гироскопа. Заготовка кронштейна устанавливалась с помощью цехового приспособления. Затем сложнопрофильная направляющая была обработана с применением базовой пятикоординатной стратегии чистового фрезерования при осевой глубине резания, равной 3 диаметрам концевой фрезы. После обработки были проконтролированы параметры шероховатости, геометрические характеристики обработанного профиля и состояние режущего инструмента. Затем процесс повторялся, и после каждого технологического перехода проводились соответствующие измерения. В результате вследствие значительного снижения стойкости режущего инструмента наблюдалось заметное ухудшение качества поверхности.

Этот процесс был повторен с применением гидравлического демпфера и демпфирующих прижимных модулей, противодействующих возникающей в зоне резания вибрационной активности. Общий вид используемого приспособления представлен на рис. 2.

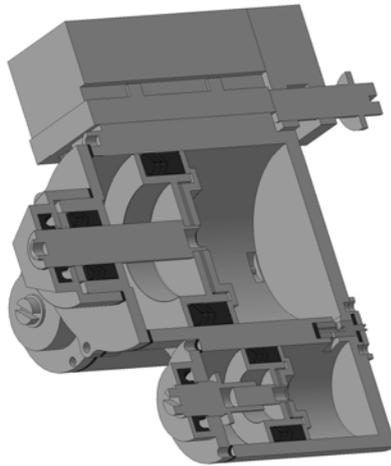


Рис. 2

Обработка проводилась без изменения стратегии движения инструмента. После каждого повторного испытания проводились измерения параметров заготовки и инструмента. В результате выявлено, что применение гидравлического демпфера совместно с демпфирующей оснасткой позволило эффективно амортизировать возникающие вибрации и снизить их влияние в зоне резания, что способствовало более стабильному фрезерованию. Итог проведенной работы — увеличение срока службы режущего инструмента в четыре раза.

Применение виброкомпенсатора при высокоскоростном фрезеровании позволяет обеспечить устойчивость процесса обработки при сравнительно большой глубине резания по-

средством диссипации энергии виброскорости. При этом коэффициенты потерь можно определить по следующей формуле:

$$\eta = \frac{1}{\pi m} \ln \frac{A_1}{A_w},$$

где m — количество колебаний, измеренное на определенном расстоянии; A_1 и A_w — амплитуда первого и последнего колебаний [13].

Для подтверждения результатов эксперимента была проведена обработка наружной поверхности тонкостенной втулки, установленной в трехкулачковый патрон. В этом случае патрон размещался непосредственно на поверхности поворотного стола; в другом случае испытания проводились с применением гидравлического демпфера, когда патрон устанавливался в демпфирующий зажимной модуль “Schunk”.

На рис. 3, а, б приведены диаграммы, характеризующие геометрическую точность радиальных размеров и отклонения формы реального профиля, полученного при чистовом фрезеровании тонкостенных заготовок, от номинального, а также параметры шероховатости $h(l)$ для вариантов инструментальной наладки без использования демпфирующих элементов (а) и с их использованием (б).

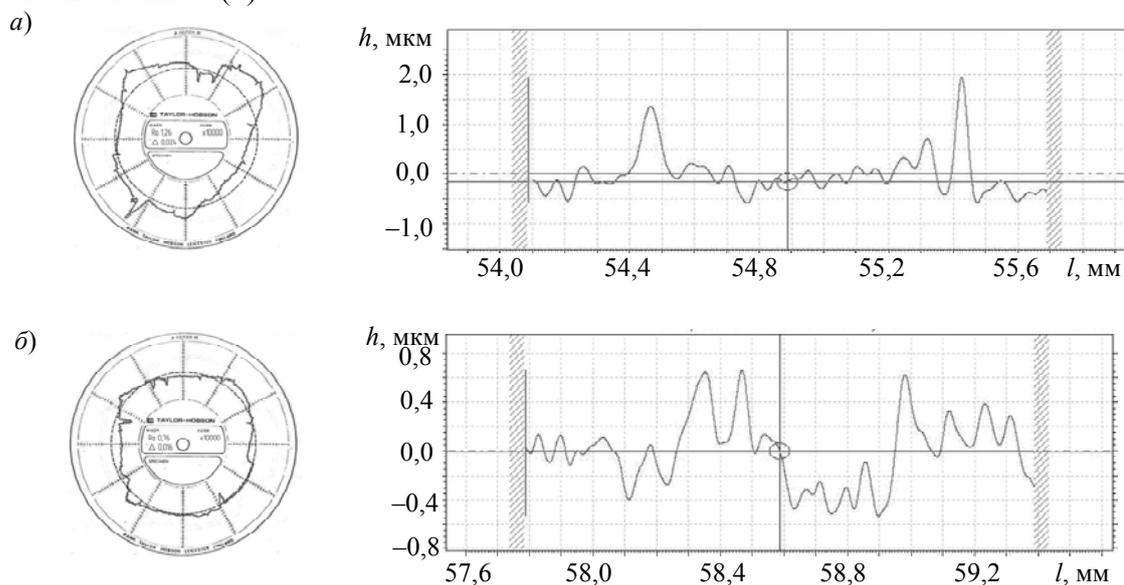


Рис. 3

На диаграмме, полученной на кругломере (см. рис. 3, б) видно, что при использовании гидравлического демпфера наблюдается значительное улучшение формы профиля обрабатываемой поверхности и геометрические размеры цилиндрической заготовки выполнены более точно; также заметно улучшение параметров шероховатости поверхности, что характеризует более стабильный процесс фрезерования.

В результате экспериментов выявлена возможность управления фрезерной наладкой как многофункциональным механическим прибором посредством влияния на ряд параметров, позволяющих обеспечивать стабильное состояние системы в рабочем режиме. Результатом выполненных исследований является снижение вибраций нежесткой фрезерной системы, обеспечивающее повышение точности изготовления детали и сокращение времени обработки за счет использования более интенсивных режимов резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирюченко Е. В. Модель влияния диаметра инструмента на виброскорость при фрезеровании плоских поверхностей // Современные фундаментальные и прикладные исследования: Междунар. науч. издание. Кисловодск: Изд-во УЦ „МАГИСТР“, 2011. № 3. С. 67—73.

2. Синопальников В. А. Надежность и диагностика технологических систем. М.: Высшая школа, 2005. 344 с.
3. Бальков И. А. О расчете шума, излучаемого заготовкой при фрезеровании / Донской гос. техн. ун-т. Ростов-на-Дону, 1996. Деп. в ВИНТИ.
4. Altintas Y. Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Cambridge University Press, 2000. DOI: 10.1115/1.1399383.
5. Иванов Н. И., Никифоров А. С. Основы виброакустики. СПб: Политехника, 2000. 412 с.
6. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. 184 с.
7. Hanna N. H., Tobias S. A. A theory of nonlinear regenerative chatter // Trans. ASME. Journal of Engineering for Industry. 1974. N 96. P. 247—255. DOI:10.1115/1.3438305.
8. Виброакустическая диагностика опор шпинделей станков для высокоскоростной обработки / М. П. Козочкин и др. // СТИН. 2010. № 6. С. 17—21.
9. Minis I., Yanushevsky T. A new theoretical approach for the prediction of the machine tool chatter in milling // Trans. ASME. Journal of Engineering for Industry. 1993. N 115. P. 1—8.
10. Балакшина Б. С. Адаптивное управление станками. М.: Машиностроение, 1973. 688 с.
11. Кудинов В. А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
12. Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей / В. Ф. Безъязычный, В. Н. Крылов, В. А. Полетаев и др. М.: Машиностроение, 2005. Ч. 1. 556 с.
13. Лукьянов А. А., Капустин А. Н., Лукьянов А. В. Алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированного термомониторинга и диагностики оборудования // Контроль. Диагностика. 2005. № 9. С. 45—53.

Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Кирилл Павлович Помпеев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения
- Артем Вадимович Расщупкин** — АО „Завод радиотехнического оборудования“, инженер-технолог; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; магистрант; E-mail: archijoke@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
09.12.16 г.

Ссылка для цитирования: Медунецкий В. М. Помпеев К. П. Расщупкин А. В. Аппаратное снижение виброскорости при фрезеровании сложнопровильных поверхностей // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 5. С. 420—425.

HARDWARE REDUCTION OF VIBRATION IN MILLING OF COMPLEX-SHAPED SURFACES

V. M. Medunetskiy¹, K. P. Pompeev¹, A. V. Rasshchupkin^{1,2}

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

²Radio Technical Apparatus Factory JSC, 192012, St. Petersburg, Russia
E-mail: archijoke@mail.ru

Cutting mode parameters for fine milling of hard materials on a multi-axis machining centers in production of space device parts are studied. Interdependence of the treatment process characteristics having the greatest impact on occurrence of parasitic vibrations in the cutting zone is revealed. The influence of cutting speed on parameters of the vibrating activity of the milling system in high speed milling mode is demonstrated. Vibratory activity that occurs during titanium alloy processing with milling machining center is investigated. The energy dissipation coefficient for vibration velocity is determined based on analysis of the data obtained using vibro-compensator in the process of fine milling. Dependence of the loss factor is derived considering the effects for high-speed machining of titanium alloys with application of the damping elements. Basic results of the study of dynamic processes occurring during end milling at high frequency and affecting the dimension processing errors are presented

Keywords: CNC machine, dissipation of energy, titanium alloys, milling system, damper system

Data on authors

- Viktor M. Medunetskiy** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Kirill P. Pompeev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies
- Artiom V. Rasshchupkin** — Radio Technical Apparatus Factory JSC; Production Engineer; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; Undergraduate Student; E-mail: archijoke@mail.ru

For citation: Medunetskiy V. M., Pompeev K. P., Rasshchupkin A. V. Hardware reduction of vibration in milling of complex-shaped surfaces // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 5. P. 420—425 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-420-425