

Просьба сослаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Журавлев, М.П. Виброустойчивость торцевых ротационных фрез / М.П. Журавлев, К.С. Мошков, И.С. Бочков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 40–47. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.05

Please cite this article in English as **(Perm Polytech Style)**:

Zhuravlev M.P., Moshkov K.S., Bochkov I.S. Vibration resistance of face rotary milling cutters. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2024, vol. 26, no. 2, pp. 40-47. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.05

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 26, № 2, 2024
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.05

УДК 621.91.01

М.П. Журавлев, К.С. Мошков, И.С. Бочков

Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Российская Федерация

ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ ТОРЦЕВЫХ РОТАЦИОННЫХ ФРЕЗ

Проанализирована виброустойчивость ротационного торцевого фрезерования, самовращение сменных многогранных пластин (СМП). Цель работы заключалась в определении математических моделей виброустойчивости технологической системы при ротационном фрезеровании различных материалов в зависимости от режимов резания, а также исследование влияния механизма самовращения СМП на динамику ротационного торцевого фрезерования.

Выполнено исследование виброустойчивости при обработке торцевыми фрезами, оснащёнными самовращающимися и жестко закреплёнными СМП. Рассматривалась технологическая система фрезерного станка, включающая фрезерный станок с ЧПУ, режущий и вспомогательный инструмент, заготовку и приспособление. Применяли метод многофакторного планирования эксперимента. Обоснована физическая модель торцевого ротационного фрезерования инструментом с самовращающимися СМП.

В результате выполнения работы были разработаны математические модели зависимости виброустойчивости для ротационного торцевого фрезерования при использовании торцевой ротационной фрезы современной конструкции с нежестким креплением от параметров режимов резания $A = f(V, S_z, t)$ и обработке конструкционных сталей 40Х и 45, а также инструментальной стали Х12МФ. Проведена серия экспериментов как для однозубого, так и многозубого фрезерования. Установлено положительное влияние ротационного резания на картину спектра частот вынужденных колебаний, в частности на снижение их амплитуды, в том числе – в отношении резонансных частот. Кроме того, предложена новая динамическая модель с учетом вклада силы трения, возникающей при самовращении пластинки о поверхность детали.

Область применения ротационного инструмента непрерывно расширяется. На основании проведенных исследований можно утверждать, что использование ротационного фрезерования является перспективным направлением для увеличения производительности обработки и возможности значительного увеличения стойкости СМП.

Ключевые слова: виброустойчивость, динамика, фрезерование, резание, эксперимент, вибрации, автоколебания, ротационное резание, ротационное фрезерование, самовращение сменных многогранных пластин.

M.P. Zhuravlev, K.S. Moshkov, I.S. Bochkov

Ural Federal University named after B.N. Yeltsin, First President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation

VIBRATION RESISTANCE OF FACE ROTARY MILLING CUTTERS

Vibration resistance of rotary face milling, self-rotation of the interchangeable polyhedral plates. The aim of the work was to determine mathematical models of vibration-stability of the technological system at rotary milling of various materials depending on the cutting modes, as well as to study the influence of the self-rotation mechanism of the interchangeable polyhedral plate (IPP) on the dynamics of rotary milling.

The investigation of vibration stability during machining with face milling cutters equipped with self-rotating and rigidly fixed IPPs was carried out. The technological system of a milling machine including CNC milling machine, cutting and auxiliary tools, workpiece and fixture was considered. The method of multifactor planning of experiment was applied. The physical model of face rotary milling with self-rotating IPP tools was substantiated.

A series of experiments was carried out for both single-tooth and multi-tooth milling. A positive effect of rotary cutting on the frequency spectrum of forced oscillations, on the reduction of their amplitude, including the resonance frequencies, has been established.

In addition, a new dynamic model is proposed, considering the contribution of friction force arising from the self-rotation of the plate on the surface of the plate. The field of application of rotary tools is continuously expanding. Based on the conducted research, it is possible to assert that the use of rotary milling is a perspective direction for increase of productivity of processing and possibility of significant increase of IPP durability.

Keywords: vibration stability, dynamics, milling, cutting, experiment, vibrations, auto oscillations, rotary cutting, rotary milling, self-rotation of interchangeable polyhedral plates.

Введение

Известно, что режущие инструменты в основном работают по принципу скольжения между режущей кромкой, сбегавшей стружкой и обработанной поверхностью [1; 2]. Скорость относительного скольжения (далее – СОС) во многом влияет на величину энергетических затрат на осуществление процесса обработки, а также на стойкость инструмента и качество обработанной поверхности, но при этом обладает существенным недостатком – постоянным присутствием контакта трущихся рабочих поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом и выделением большого количества тепла. В результате тепловые и силовые нагрузки концентрируются по линии режущей кромки, что влияет на режущую способность и не позволяет увеличивать режимы резания в значительной мере [3; 4].

Уменьшение СОС в контактных зонах инструмента с обрабатываемым материалом может быть реализовано заменой скольжения на качение при их взаимодействии. Инструменты, осуществляющие данный процесс, ранее названы «ротационными» [5; 6]. Именно в данном типе инструментов заложен большой резерв повышения стойкости инструмента и производительности обработки.

Таким образом, существует необходимость в применении ротационного резания [7; 8] (далее – РР), дающего возможность в процессе обработки постоянно обновлять рабочую кромку режущего инструмента, т. е. увеличивать длину активного участка лезвия относительно зоны резания, которое активизирует теплоотвод из последней и снижает температуру резания. Данное явление позволяет значительно увеличить стойкость инструмента (от 10 до 100 раз) или же при сохранении периода стойкости на прежнем уровне кратно (от 2 до 10 раз) увеличить допустимую скорость резания [9; 10].

Главным преимуществом РР является возможность его применения на обычном металлорежущем оборудовании с использованием специального ротационного инструмента, режущая часть которого имеет форму конической «чашки» с возможностью вращения вокруг своей собственной оси. В процессе обработки непрерывность указанного вращения, которое происходит вследствие контакта с обрабатываемым материалом, обеспечивается соответствующей установкой СМП относительно обрабатываемой поверхности. При этом в процессе резания режущая часть инструмента должна иметь форму тела вращения, т.е. «ротора» [11; 12]. Далее рассмотрим механизм образования вибрационного следа на поверхности резания и физическую модель ротационного торцевого фрезерования.

Физическая модель ротационного торцевого фрезерования

Как известно [12; 13], одним из факторов, влияющих на работоспособность инструмента, является интенсивность вибрационных процессов. Именно поэтому определение условий для снижения вибраций в процессе обработки металлов резания представляет актуальную задачу повышения долговечности и качества работы инструментов.

Отметим, что физическую модель развития автоколебаний при торцевом фрезеровании можно представить как случайное возмущение, полученное при врезании зуба инструмента в поверхность металла, что, в свою очередь, вызывает собственные затухающие колебания технологической системы [14; 15]. Как видно на рис. 1 и 2, зуб фрезы следует по окружности, но на самом деле под воздействием вибраций он совершает некоторые асимптотические колебания вокруг круговой траектории движения. Второй зуб фрезы в данном случае идет уже по существующему вибрационному следу,

усиливая вибрационный процесс. Таким образом, на поверхности резания остается вибрационный след зубьев. На 10–14-м врезании зуба в заготовку увеличение амплитуды колебаний технологической системы достигает своего максимального значения, затем процесс обработки стабилизируется [16–18].

При этом важно отметить, что на поверхности резания возникает волнообразный след, который при втором обороте инструмента при однозубом фрезеровании или с прохода второго зуба при многозубом фрезеровании будет передавать дополнительную порцию энергии в технологическую систему при каждом новом врезании в заготовку, что, в свою очередь, вызовет усилие общей картины колебаний системы (схему образования вибрационного следа см. на рис. 1 и 2). В результате собственные затухающие колебания переходят в незатухающие колебания [19; 20].

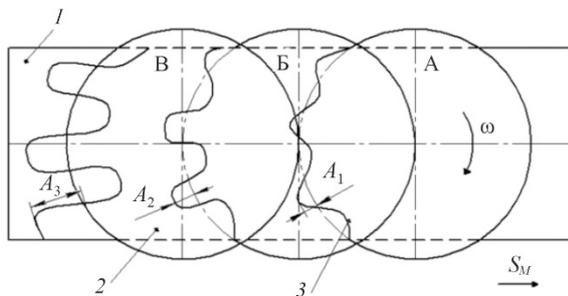


Рис. 1. Изображение следа на поверхности резания [13]: 1 – заготовка; 2 – фреза; 3 – поверхность следа; A_1, A_2, A_3 – последовательные приращения к следам на поверхности резания; А, Б, В – последовательные положения фрезы; ω – направление вращения фрезы; S_M – минутная подача

При этом через некоторое время переходного процесса (в данном эксперименте примерно после 1/3 времени обработки) наступает равновесие между энергией, поступающей в систему, и энергией, рассеиваемой при вибрациях. В результате устанавливается определенный уровень автоколебаний с периодически изменяющейся амплитудой в форме биения вследствие случайных толчков и дополнительного демпфирования технологической системы [21–23].

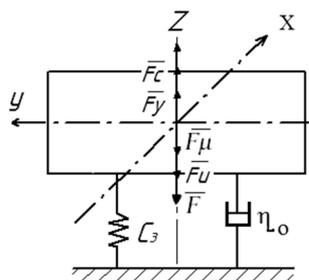


Рис. 2. Динамическая модель технологической системы при фрезеровании [5]

Тогда ее математическую модель в общем виде можно выразить через формулу (1):

$$m \cdot \ddot{y}(t) + h_0 \cdot \dot{y}(t) + C \cdot y(t) = P_z + P_\mu, \quad (1)$$

где m – приведенная масса технологической системы, кг; h_0 – обобщенный коэффициент сопротивления (демпфирования), Н·с/м; C – обобщенный коэффициент жесткости, Н/м; P_z – составляющая силы резания, Н; P_μ – сила трения качения СМП по поверхности заготовки.

Методика проведения экспериментальных исследований

В настоящей работе выполнено исследование виброустойчивости при обработке торцевыми фрезами с различным типом крепления пластин (с жестким и нежестким креплением) на основе методики проведения полного факторного эксперимента (ПФЭ) [4; 5].

Схема фрезерования. В общем случае сила резания при фрезеровании направлена в пространстве под некоторым углом, положение которой неизвестно. Поэтому при проведении испытаний силу резания определяют ее составляющие P_z, P_y, P_x в трех взаимно-перпендикулярных направлениях. Методика проведения экспериментальных исследований предусматривала измерение уровня вибраций в направлении соответствующих сил резания [12; 13].

На рис. 3 представлена попутная схема фрезерования, используемая при проведении экспериментов.

Обрабатываемые материалы. Для исследований выбирались предварительно обработанные заготовки размерами: длина – 120 мм, ширина – 30 мм, высота – 80 мм, из конструкционной стали 40Х твердостью 40 HRC, стали 45 и инструментальной стали Х12МФ в состоянии поставки.

Оборудование. Испытания проводили на лабораторном стенде с использованием в качестве базового широкоуниверсального фрезерного станка модели 6К82Ш, установленного на виброопорах. Состояние станка соответствовало нормам точности и жесткости, указанным в паспортных данных.

Инструмент. В качестве режущего инструмента применялись торцевая ротационная фреза компании Pokolm (ФРГ) с самовращающимися пластинками $\varnothing 12$ мм и классическая торцевая фреза компании Sant (КНР) с механически жестко закрепленными пластинками $\varnothing 12$ мм [24; 25].

Режимы резания. Режимы резания для двух видов фрез при обработке перечисленных сталей находились в следующем диапазоне: скорость резания $V =$ от 78,5 до 219,9 м/мин, подача на зуб $S_z =$ от 0,083 до 0,176 мм/зуб, глубина резания $t =$ от 0,2 до 2 мм.

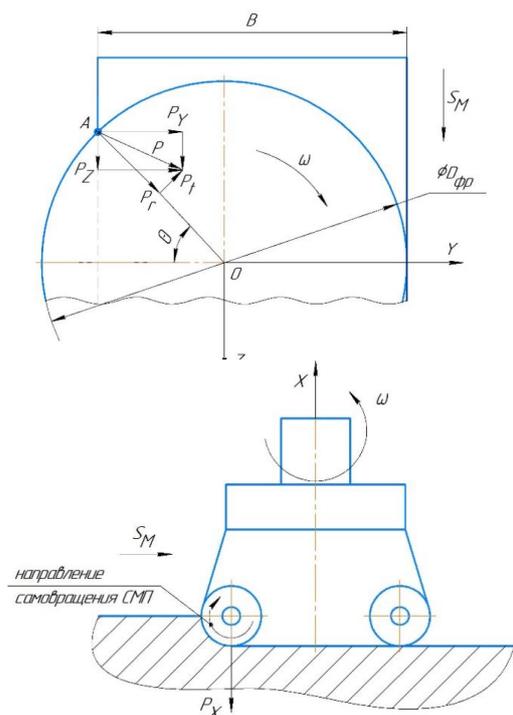


Рис. 3. Схема торцевого фрезерования: P_z, P_y, P_x – проекции силы резания на координатные оси; P – равнодействующая проекций силы резания; P_r – радиальная составляющая силы резания; P_t – тангенциальная (окружная) составляющая силы резания; B – ширина фрезерования; S_M – минутная подача фрезы; A – точка на поверхности фрезы; θ – угол положения точки A относительно оси Y ; ω – угловая скорость вращения фрезы; $D_{фр}$ – диаметр фрезы

Обработка данных. Для сбора данных использовался трехкомпонентный виброанализатор «Экофизика-110В» с датчиком 317A41 для измерения виброскорости с пьезоэлектрическим трехкомпонентным датчиком. Программная реализация математических методов выполнена в программном обеспечении Matlab R2013. Для проведения замеров вибраций было выбрано направление оси Z станка по причине наибольшего влияния изменяемой толщины срезаемого слоя материала заготовки на виброустойчивость фрезерования на основе теории следа на поверхности резания [12; 16].

Результаты проведения экспериментов

На рис. 4 представлен график изменения виброскорости на участке установившегося резания в направлении оси Z при обработке фрезой Sant на режиме: скорость резания $V = 157,5$ м/мин, подача на зуб $S_z = 0,176$ мм/зуб, глубина резания $t = 1$ мм. При этом средний уровень вибраций достигает 176,8 дВ.

На рис. 5 представлен график изменения виброскорости на участке установившегося резания в направлении оси Z при обработке фрезой Pokolm на режиме: скорость резания $V = 157,5$ м/мин,

подача на зуб $S_z = 0,176$ мм/зуб, глубина резания $t = 1$ мм. При этом средний уровень вибраций достигает 185,9 дВ.

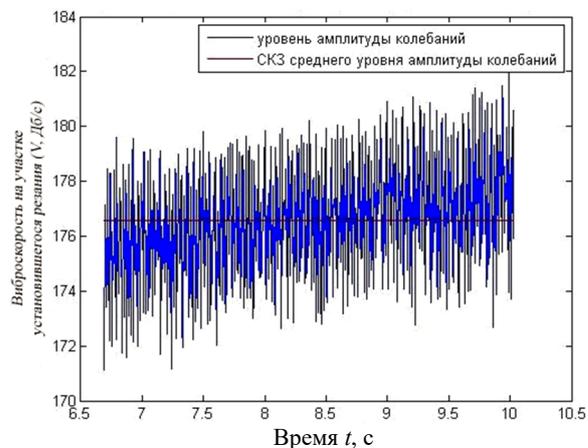


Рис. 4. График виброскорости на участке установившегося резания. Ось Z . Фреза Sant

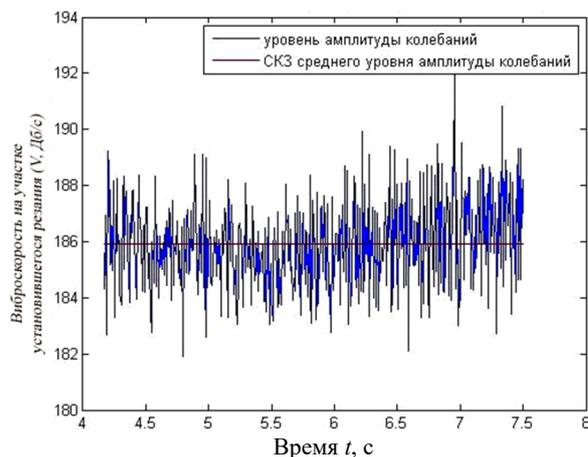


Рис. 5. График виброскорости на участке установившегося резания. Ось Z . Фреза Pokolm

Уравнение изменения виброскорости вдоль оси Z для фрезы Pokolm выглядит следующим образом (2):

$$V_z = \frac{e^{5,674} \cdot V^{0,199} \cdot S_z^{0,690} \cdot (\ln V \cdot \ln S_z)^{0,005}}{(\ln V \cdot \ln t)^{0,0012} \cdot (\ln S_z \cdot \ln t)^{0,0009} \cdot (\ln V \cdot \ln S_z \cdot \ln t)^{0,00019}} \quad (2)$$

Уравнение изменения виброскорости вдоль оси Z для фрезы Sant выглядит следующим образом (3):

$$V_z = \frac{e^{11,332} \cdot V^{0,128} \cdot S_z^{2,458} \cdot (\ln V \cdot \ln S_z)^{0,130} \cdot (\ln V \cdot \ln t)^{0,0021} \cdot (\ln V \cdot \ln S_z \cdot \ln t)^{0,00007}}{t^{0,027} \cdot (\ln S_z \cdot \ln t)^{0,0028}} \quad (3)$$

На рис. 6 представлены графики зависимости вибраций от параметров режимов резания в соответствии с математическими моделями для двух типов фрез.

На основании сравнения графиков изменения виброскорости от параметров режимов резания

было установлено, что во всех трех случаях значения виброскорости при использовании ротационного инструмента был выше на 5,36 %, что показывает незначительное ухудшение виброустойчивости в сравнении с инструментом с жестким креплением пластин.

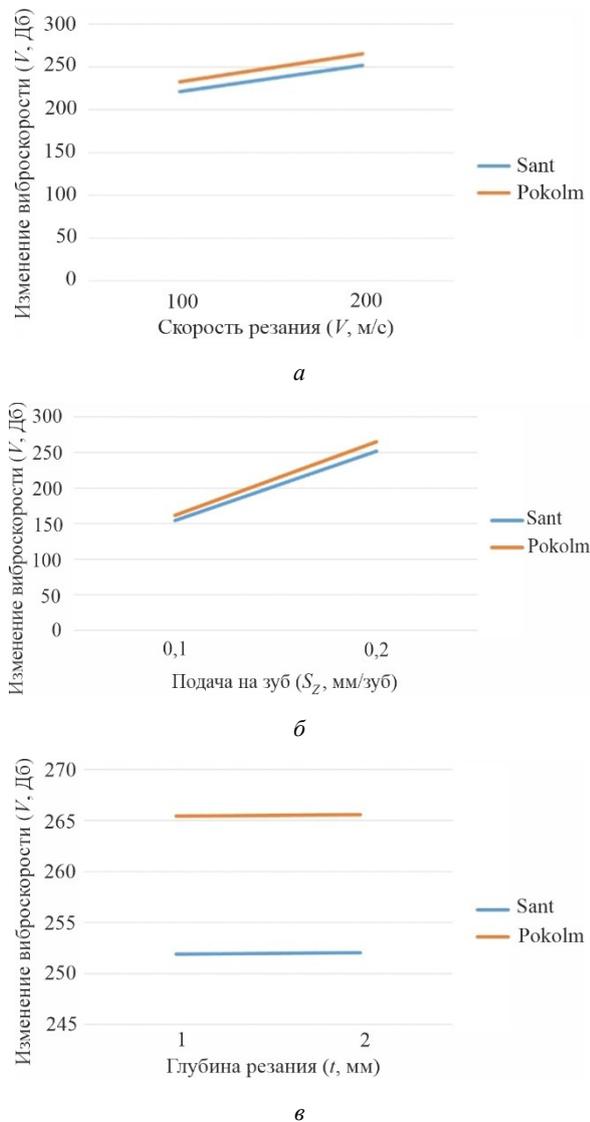


Рис. 6. График изменения виброскорости: а – от скорости резания; б – от подачи на зуб; в – от глубины резания

Для наиболее наглядного представления резонансных частот рассмотрим графики спектра для установившегося процесса резания при многозубом фрезеровании стали 40Х фрезой Pokolm на режимах резания $V = 157,1$ м/мин; $S_2 = 0,170$ мм/зуб; $t = 1$ мм в логарифмическом масштабе (рис. 7, 8).

Так, на рис. 8 видно, что наибольшие значения амплитуды колебаний при явлении резонанса достигают своих пиков в отрицательной полуплоскости при частотах 8 Гц (66 Дб), 16 (49 Дб), 23 Гц (63 Дб), 30 Гц (62 Дб), 63 Гц (53 Дб).

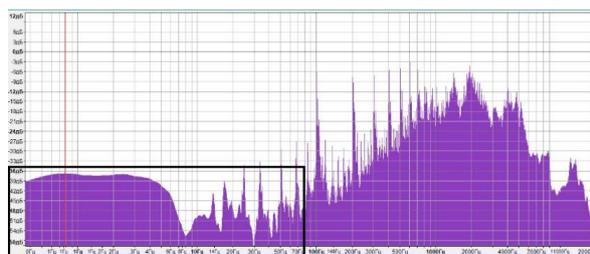


Рис. 7. График спектра (Pokolm) по оси Z в логарифмическом масштабе. Примечание: выделенная область рис. 6, в, представлена на рис. 8

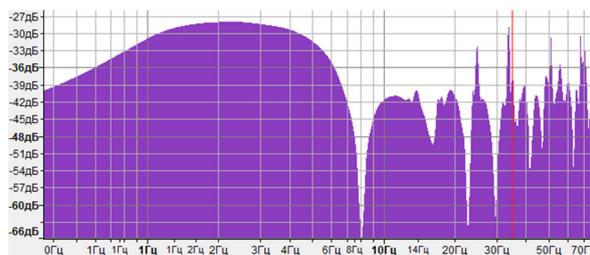


Рис. 8. Увеличенный фрагмент графика спектра (Pokolm) по оси Z диапазона вынужденных колебаний в логарифмическом масштабе

Для сравнения рассмотрим графики спектра для установившегося процесса резания при многозубом фрезеровании стали 40Х фрезой Sant на таких же режимах резания, как у фрезы Pokolm: $V = 157,1$ м/мин; $S_2 = 0,173$ мм/зуб; $t = 1$ мм в линейном и логарифмическом масштабах (см. рис. 9, 10).

При этом при сравнении картин спектра фрез с жестким (Sant) и нежестким (Pokolm) креплением СМП наблюдается интересная закономерность: большинство частот вынужденных колебаний при обработке фрезой Pokolm, в том числе резонансных, обладают меньшей амплитудой колебаний на картине спектра, чем у фрезы с жестким креплением СМП (см. рис. 9, 10).

Например, резонансная частота 12 Гц при обработке фрезой с жестким креплением пластин Sant обладает большей амплитудой колебаний (85 Дб) в сравнении наибольшей амплитудой колебаний у при обработке ротационной фрезой Pokolm (66 Дб).

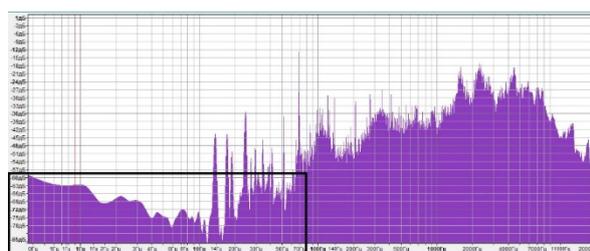


Рис. 9. График спектра (Sant) по оси Z в логарифмическом масштабе. Примечание: выделенная область представлена на рис. 10

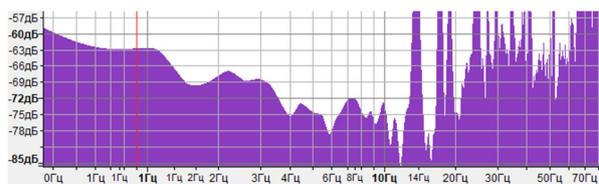


Рис. 10. Увеличенный фрагмент графика спектра (Sant) по оси Z диапазона вынужденных колебаний в логарифмическом масштабе

Заключение

Выполнены эксперименты по определению уровня вибраций резонансных частот колебаний технологической системы торцевых фрез с самовращающимися СМП и с жестким креплением пластин. Основные результаты приведены на рис. 6–10.

Результаты работы показывают, что средний уровень вибраций при работе фрезой с самовращающимися зубьями незначительно выше, чем при работе фрезы с жестким креплением пластин.

Однако наблюдается существование обратной закономерности виброустойчивости, наблюдаемой на картине спектра. Данное явление объясняется тем, что в процессе фрезерования ротационной фрезой происходит наложение дополнительных источников вибрации в противофазе с источниками колебаний под воздействием сил резания. В результате наложения сигналов одинаковой частоты в противофазе суммарная амплитуда колебаний для заданной частоты принимает меньшие значения, что можно увидеть на картине спектра в логарифмическом масштабе (см. рис. 8, 10), позволяющем улучшить разрешающую способность отображения резонансных частот величиной до 100 Гц с целью их более наглядного представления на графике спектра. Дополнительные случайные колебания возникают по причине наличия дополнительных степеней свободы самовращающихся СМП из-за зазоров при их установке в тело ротационной фрезы.

Таким образом, можно сказать, что при увеличении параметров режимов резания в случае применения ротационного фрезерования будет наблюдаться меньший рост вибраций при работе в диапазоне частот, расположенных рядом с зоной возникновения резонанса.

Библиографический список

1. Коновалов, Е.Г. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко, А.В. Соусь. – Минск: Наука и техника, 1972. – С. 272.
2. Ермаков, Ю.М. Развитие способов ротационного резания / Ю.М. Ермаков. – М., 1989. – 56 с., 30 ил. (Машиностроит. пр-во. Сер. Технология и оборудование обработки металлов резанием: Обзор.информ./ВНИИИТЭМР. Вып.3).

3. Коновалов, Е.Г. Чистовая и упрочняющая ротационная обработка поверхностей / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко. – Минск: Вышэйшая школа, 1968. – 364 с.

4. Lu, Yujiang Research on cutting performance in high-speed milling of TC11 titanium alloy using self-propelled rotary milling cutters / Yujiang Lu, Chen Tao // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 116. – P. 2125–2135.

5. Шаламов, В.Г. Динамика ротационного фрезерования / В.Г. Шаламов, С.Д. Сметанин // Наука ЮУрГУ: материалы 69-й конференции. Секции технических наук. – 2017. – С. 198–202.

6. Shalamov, V.G. Shaping of Cell Chips at Rotary Milling / V.G. Shalamov, V.I. Guzeev, S.D. Smetanin // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016. Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 878–881.

7. Сметанин, С.Д. Геометрические параметры режущего лезвия ротационной фрезы / С.Д. Сметанин // Наука ЮУрГУ: материалы 71-й научной конференции. Секции технических наук. – 2019. – С. 148–154.

8. Зубков, Н.Н. Реализация метода деформирующего резания ротационными резцами. Определение геометрических параметров зоны обработки / Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников, А.В. Седов // Известие высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 67–73.

9. Шатуров, Д.Г. Исследование геометрических параметров чашечного резца с обновляемой режущей кромкой / Д.Г. Шатуров, А.А. Жолобов, Г.Ф. Шатуров // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – № 1. – С. 81–87.

10. Шатуров, Д.Г. Исследование динамики процесса резания многопроходным чашечным резцом / Д.Г. Шатуров // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 3 ч. – Могилёв, 22–23 апр. 2010 г. – Могилев, 2010. – Ч. 1. – С. 81.

11. Капитуров, Р.В. Механика вращения режущей пластины в круглом чашечном самовращающемся резце / Р.В. Капитуров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс: периодическое научное издание. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. ун-та, 2015. – № 02(24). – 196 с. – С. 162–173.

12. Жарков, И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с.

13. Журавлев, М.П. Исследование и испытание технологических систем: учеб. пособие / М.П. Журавлев. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 84 с.

14. Журавлев, М.П. Виброустойчивость при обработке торцевыми фрезами с переменным шагом / М.П. Журавлев, К.Ю. Кравченко, Д.М. Элькинд // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. № 8 (69). – С. 14–24.

15. Журавлев, М.П. Эксплуатация металлорежущих станков: лабораторный практикум для студентов вуза, обучающихся по направлениям подготовки 15.03.05, 15.04.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств [Электронный ресурс] / М.П. Журавлев, С.С. Кугаевский, Д.М. Элькинд; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого

Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 68 с.

16. Исследование вибраций при осевом фрезеровании / М.П. Журавлев, Д.М. Элькинд, Н.И. Зеленин, К.С. Мошков // Проблемы научно-практической деятельности. Поиск и выбор инновационных решений [кон-406]: сборник статей международной научно-практической конференции (г. Омск, РФ, 17 декабря 2021 г.). – Уфа: Omega science, 2021. – С. 51–55.

17. Мошков, К.С. Импортозамещение ротационных фрез / К.С. Мошков, М.П. Журавлев, Д.М. Элькинд // Технологический суверенитет машиностроительного комплекса России: материалы всероссийской научно-практической конференции (Екатеринбург, 19 мая 2023 г.) / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – М: Первое экономическое издательство, 2023. – С. 30.

18. Жолобов, А.А. Динамика процесса и эффективная мощность при точении с многократным микрообновлением режущей кромки / А.А. Жолобов, А.Н. Рязанцев, Д.Г. Шатуров // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2010. – № 3. – С. 40–48.

19. Гатитулин, М.Н. Ротационные режущие инструменты / М.Н. Гатитулин, В.И. Портнягин // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – С. 36–42.

20. Гатитулин, М.Н. Механика самовращения круглых режущих элементов ротационной фрезы / М.Н. Гатитулин, С.Д. Сметанин // Альманах современной науки и образования. – 2009. – № 12 (31). – С. 21–26.

21. Металлорежущий инструмент РОКОЛМ: Инновационные системы фрезерования: материалы технического семинара. – Екатеринбург, 2021.

22. Euanac, I.G. Modeling Static and Dynamic Cutting Forces and Vibrations for Inserted Ceramic Milling Tools / I.G. Euanac, E. Ozturkb, N.D. Sims // 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO) Procedia CIRP. – 2013. – Vol. 8. – P. 564–569.

23. Comparative study on the cutting performance of self-propelled rotary cutters and indexable cutters in milling TC11 titanium alloy / Tao Chen, Yongsheng Wang¹, Weijie Gao, Rui Li // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Received: 3 June 2020 / Accepted: 19 October 2020.

24. Каталог инструмента Pokolm [Электронный ресурс] / Торговый Дом ООО «Ярко»: официальный сайт. – URL: <https://tdyarko.ru/pocolmfrez.html> (дата обращения: 31.03.2023).

25. Каталог инструмента Sant [Электронный ресурс] / Группа компаний «ЧТС»: официальный сайт. – URL: <https://chts74.ru/brands/sant/> (дата обращения: 31.03.2023).

References

1. Konovalov E.G., Sidorenko V.A., Sous' A.V. Progressive schemes of rotary cutting of metals [Progressive schemes of rotary cutting of metals]. Minsk, «Nauka i tekhnika», 1972, p. 272.

2. Ermakov Iu.M. Razvitie sposobov rotatsionnogo rezaniia [Development of rotary cutting methods]. Moscow, 1989, 56 p.

3. Konovalov E.G., Sidorenko V.A. Chistovaia i uprochniaushchaia rotatsionnaia obrabotka poverkhnosti [Finishing and hardening rotary machining of surfaces]. Minsk, «Vysheishaia shkola», 1968, 364 p.

4. Lu Yujiang & Chen Tao Research on cutting performance in high-speed milling of TC11 titanium alloy using self-propelled rotary milling cutters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, no. 116, pp. 2125–2135.

5. Shalamov V.G. Dinamika rotatsionnogo frezerovaniia [Rotary milling dynamics]. *Sektzii tekhnicheskikh nauk*, 2017, pp. 198–202.

6. Shalamov V.G., Guzeev V.I., Smetanin S.D. Shaping of Cell Chips at Rotary Milling. International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016. *Procedia Engineering*, 2016, no. 150, pp. 878–881.

7. Smetanin S.D. Geometricheskie parametry rezhushchego lezviia rotatsionnoi frezy [Geometrical parameters of the cutting blade of the rotary cutter]. *Nauka IuUrGU: materialy 71-i nauchnoi konferentsii. Sektzii tekhnicheskikh nauk*, 2019, pp. 148–154.

8. Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Sedov A.V. Realizatsiia metoda deformiruiushchego rezaniia rotatsionnymi reztzami. Opredelenie geometricheskikh parametrov zony obrabotki. [Realization of the method of deforming cutting with rotary cutters. Determination of geometric parameters of the machining zone]. *Izvestie vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2012, no. 1, pp. 67–73.

9. Shaturov D.G., Zholobov A.A., Shaturov G.F. Issledovanie geometricheskikh parametrov chashechnogo reztza s obnovliaemoi rezhushchei kromkoi [Investigation of geometrical parameters of cup cutter with renewable cutting edge]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta*, 2013, no. 1, pp. 81–87.

10. Shaturov D.G. Issledovanie dinamiki protsessa rezaniia mnogoprokhodnym chashechnym reztzom [Investigation of the dynamics of the cutting process with a multi-pass cup cutter]. *Materialy, oborudovanie i resursoberegaiushchie tekhnologii: materialy Mezhdunar. nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, 2010, part 1, p. 81.

11. Kapiturov R.V. Mekhanika vrashcheniia rezhushchei plastiny v kruglom chashechnom samovrashchaiushchemsia reztze [Mechanics of cutting insert rotation in a circular cup-shaped self-rotating cutter]. «XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoiashchego plus»: Periodicheskoe nauchnoe izdanie. Penza: Izdatelstvo Penzinskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2015, no. 02(24), pp. 162–173.

12. Zharkov I.G. Vibratsii pri obrabotke lezviinym instrumentom [Vibrations during machining with blade tools]. Leningrad: Mashinostroenie, 1986, 184 p.

13. Zhuravlev M.P. Issledovanie i ispytanie tekhnologicheskikh sistem: uchebnoe posobie [Research and testing of technological systems: textbook]. Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2017, 84 p.

14. Zhuravlev M.P., Kravchenko K.Iu., El'kind D.M. Vibroustoichivost' pri obrabotke tortsevymi frezami s peremennym shagom [Vibration resistance during machining with variable pitch end mills]. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, no. 8 (69), pp. 14–24.

15. Zhuravlev M.P. Ekspluatatsiia metallorezhushchikh stankov: laboratornyi praktikum dlia studentov vuza, obuchaiushchikhsia po napravleniiam podgotovki 15.03.05,

15.04.05 – Konstruktorsko-tehnologicheskoe obespechenie mashinostroitel'nykh proizvodstv [Operation of metal-cutting machine tools: laboratory practice for university students]. M. P. Zhuravlev, S.S. Kugaevskii, D.M. El'kind. Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2017, 68 p.

16. Zhuravlev M.P., El'kind D.M., Zelenin N.I., Moshkov K.S. Issledovanie vibratsii pri osevom frezerovanii [Investigation of vibrations during axial milling]. *Problemy nauchno-prakticheskoi deiatel'nosti. Poisk i vybor innovatsionnykh reshenii [kon-406]: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Omega science*, 2021, pp. 51–55.

17. Moshkov K.S., Zhuravlev M.P., El'kind D.M. Importozameshchenie rotatsionnykh frez [Import substitution of rotary cutters]. *Tekhnologicheskii suverenitet mashinostroitel'nogo kompleksa Rossii: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Moskva: Pervoe ekonomicheskoe izdatel'stvo, 2023, p. 30.

18. Zholobov A.A., Riazantsev A.N., Shaturov D.G. Dinamika protsessa i effektivnaia moshchnost' pri tochenii s mnogokratnym mikroobnovleniem rezhushchei kromki [Process dynamics and effective power during turning with multiple micro-renewal of the cutting edge]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 40–48.

19. Gatitulin M.N., Portniagin V.I. Rotatsionnye rezhushchie instrumenty // Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii: Sb. nauch. tr. – Cheliabinsk: Izd-vo IuUrGU, 2006. – s. 36–42.

20. Gatitulin M.N., Smetanin S.D. Mekhanika samovrashcheniia kruglykh rezhushchikh elementov rotatsionnoi frezy [Mechanics of self-rotation of circular cutting elements of rotary milling cutter]. *Al'manakh sovremennoi nauki i obrazovaniia*, 2009, no. 12 (31), pp. 21–26.

21. Materialy tekhnicheskogo seminarra «Metallorezhushchii instrument POKOLM: Innovatsionnye sistemy frezerovaniia» [POKOLM Metal Cutting Tools: Innovative Milling Systems: Proceedings of the Technical Seminar]. Ekaterinburg, 2021.

22. Euanac I.G., Ozturkb E., Sims N.D. Modeling Static and Dynamic Cutting Forces and Vibrations for Inserted Ceramic Milling Tools. *14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO) Procedia CIRP* 8, 2013, pp. 564 – 569.

23. Tao Chen & Yongsheng Wang1 & Weijie Gao & Rui Li. Comparative study on the cutting performance of self-propelled rotary cutters and indexable cutters in milling TC11 titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Received*, 2020.

24. Katalog instrumenta Pokolm [Pokolm Tool Catalog]. Torgovyi Dom OOO «Iarko» ofitsial'nyi sait. URL: <https://tdyarko.ru/pocolmfrez.html> (data available 31.03.2023).

25. Katalog instrumenta Sant [Sant tool catalog]. Gruppa kompanii «ChTS» ofitsial'nyi sait. URL: <https://chts74.ru/brands/sant/> (data available 31.03.2023).

Поступила: 21.12.2023

Одобрена: 27.01.2024

Принята к публикации: 13.05.2024

Об авторах

Журавлев Михаил Петрович (Екатеринбург, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, станки и инструменты, Институт новых материалов и технологий Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Российская Федерация, 620002 г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: mzhuravlev12@gmail.com).

Мошков Кирилл Сергеевич (Екатеринбург, Российская Федерация) – аспирант кафедры технологии машиностроения, станки и инструменты, Институт новых материалов и технологий Уральского федерального университета им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина; (Российская Федерация, 620002 г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: moshkov-ks@mail.ru).

Бочков Иван Сергеевич (Екатеринбург, Российская Федерация) – магистрант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский энергетический институт Уральского федерального университета им. Президента России Б.Н. Ельцина (Российская Федерация, 620002 г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: ivanbochkoff@gmail.com).

About the authors

Michail P. Zhuravlev (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools, Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; e-mail: mzhuravlev12@gmail.com).

Kirill C. Moshkov (Ekaterinburg, Russian Federation) – Postgraduate student, Department of Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools, Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; e-mail: moshkov-ks@mail.ru).

Ivan C. Bochkov (Ekaterinburg, Russian Federation) – Master, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ural Energy Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; e-mail: ivanbochkoff@gmail.com).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы благодарны сотрудникам и директору ООО «Геометра» Лавринову Дмитрию Сергеевичу за помощь в написании программы обработки данных в среде Matlab.

Вклад авторов равноценен.