

Разработка конструкции экспериментальной оснастки для подавления автоколебаний технологической системы при торцовом фрезеровании

С. В. Четвериков✉

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация

✉ serga652008@yandex.ru

Резюме

Одним из самых нежелательных явлений, проявляющихся при обработке нежестких деталей, является возникновение автоколебаний заготовки, вследствие чего происходит ухудшение шероховатости и точности обработанной поверхности, преждевременный износ инструмента и выход его из строя. Решению проблемы повышения динамической устойчивости технологической системы при обработке нежестких деталей посвящено много различных научных работ. В производственных условиях для снижения опасности возникновения автоколебаний чаще всего изменяют режимы резания, что влечет за собой потерю производительности. Для борьбы с автоколебаниями, возникающими при обработке деталей, разработаны разные способы. Суть их в основном сводится к применению различных демпферов. Для борьбы с автоколебаниями более целесообразным является не гашение возникающих автоколебаний, а создание условий для их исключения. Такой подход строится на основе понимания физики процесса возбуждения автоколебаний. В представленной работе исследована принципиальная возможность гашения автоколебаний путем применения стандартных режущих пластин с измененным значением заднего угла. В ходе работы решена научно-техническая проблема повышения динамической устойчивости процесса торцевого фрезерования нежестких заготовок. Рассмотрены существующие способы и средства повышения виброустойчивости и производительности процессов торцевого фрезерования. Выбран перспективный путь подавления автоколебаний путем использования инструмента с режущими пластинами с измененным задним углом. Экспериментально доказана возможность гашения вибраций за счет изменения значения заднего угла режущей пластины. Разработана методика проведения экспериментов, сделаны необходимые измерения. Проведенные исследования показали целесообразность использования режущих пластин с измененным задним углом при фрезеровании нежестких деталей.

Ключевые слова

автоколебания, фрезерование нежестких заготовок, инструмент, режущая пластина, динамическая устойчивость, скорость резания

Для цитирования

Четвериков С. В. Разработка конструкции экспериментальной оснастки для подавления автоколебаний технологической системы при торцовом фрезеровании // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 10–20. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).10-20

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.09.2021, поступила после рецензирования: 10.10.2021, принята к публикации: 27.10.2021

Development of the design of the experimental fitting to suppress autooscillations of technological system during the face milling

S. V. Chetverikov✉

Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, the Russian Federation

✉ serga652008@yandex.ru

Abstract

One of the most undesirable phenomena that occur when processing non-rigid parts is the occurrence of self-oscillation of the work piece, which results in: deterioration of the roughness and accuracy of the treated surface, premature wear of the tool and its failure. Therefore, many scientific papers have been devoted to solving the problem of increasing the dynamic stability of a technological system when processing non-rigid parts. In production conditions, to reduce the risk of self-oscillation, cutting modes are most often changed, which leads to loss of productivity. Various methods have been developed to deal with self-oscillations that occur during the processing of parts. Their essence is mainly reduced to the use of various dampers. To deal with self-oscillations, it is more appropriate not to extinguish the arising self-oscillations, but to create conditions for their non-occurrence. This approach is based on an understanding of the physics of the self-oscillation excitation process. In this paper, the principal possibility of damping self-oscillations by using standard cutting plates with a modified value of the rear angle is investigated. In the course of the work, the scientific and technical problem of increasing the dynamic stability of the process of face milling of non-rigid work pieces was solved. The existing methods and means of increasing vibration stability and productivity of face mill-

ing processes are considered. A promising way to suppress self-oscillation by using a tool with cutting plates with a modified back angle is selected. The possibility of vibration damping by changing the value of the rear angle of the cutting plate is experimentally proved. The method of conducting experiments was developed, and the necessary measurements were made. Studies have shown the feasibility of using cutting plates with a modified back angle when milling non-rigid parts.

Keywords

autooscillations, milling of nonrigid work parts, tool, cutting plate, dynamic stability, cutting speed

For citation

Chetverikov S. V. Razrabotka konstruksii ehksperimental'noy osnastki dlya podavleniya avtokolebaniy tekhnologicheskoy sistemy pri tortsovom frezerovanii [Development of the design of experimental equipment for suppressing self-oscillations of the technological system during face milling]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 10–20. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).10-20

Article Info

Received: 15.09.2021, Revised: 10.10.2021, Accepted: 27.10.2021

Введение

Фрезерование характеризуется высокой динамичностью нагружения системы, приближающегося к ударному воздействию. Особенно это проявляется при обработке узких поверхностей. Периодическое резание приводит к возникновению вынужденных колебаний и автоколебаний. В данной работе исследована принципиальная возможность гашения автоколебаний путем применения стандартных режущих пластин с измененным значением заднего угла. Для борьбы с автоколебаниями, возникающими при обработке деталей, разработаны различные способы. Суть их в основном сводится к применению различных демпферов [1–4]. Для борьбы с автоколебаниями более целесообразным является создание условий для их исключения. Такой подход строится на основе понимания физики процесса возбуждения автоколебаний [5–8]. В данном случае объектом исследования является изучение динамической устойчивости процесса торцевого фрезерования нежестких заготовок [9, 10], а предметом исследования – рекомендации по изменению зна-

чения заднего угла режущих пластин стандартной фрезы.

Оборудование, инструмент, приспособление

Для создания податливости к автоколебаниям было изготовлено приспособление (рис. 1).

Приспособление представляет собой упругую П-образную державку, закрепленную в станочных тисах. Заготовка 2 крепится к приспособлению 4 шестью болтами М10. В отверстие шпинделя устанавливается оправка с фрезой 1. Токовихревой датчик 3 устанавливается на магнитную стойку 5 и настраивается таким образом, чтобы зазор между датчиком и приспособлением составил 1,6 мм. Зазор выставляется с помощью щупа. Датчик подключается к модулю ZET LAB 210, который соединен с персональным компьютером, для вывода данных на экран монитора и их обработки.

Заточка режущих пластин торцевой фрезы

Режущая пластина состоит из четырех граней, поэтому на одном наборе пластин можно произвести восемь вариантов заточки. [11–15].



Рис. 1. Настройка оборудования перед началом опытов

Fig. 1. Setting up equipment before starting experiments

В первую очередь затачивался нулевой задний угол на всех восьми гранях пластин до достижения 2 мм нулевой площадки. Предварительная заточка пластин представлена на рис. 2.

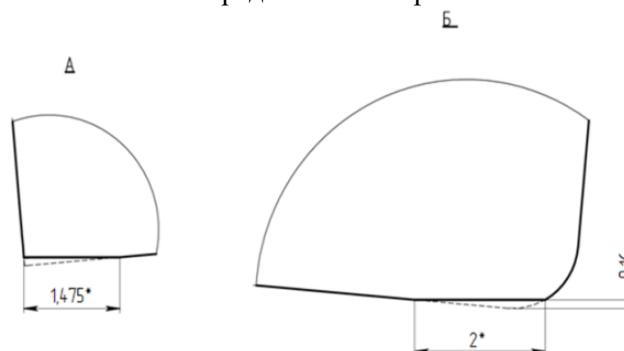


Рис. 2. Предварительная заточка пластин
Fig. 2. Pre-sharpening of plates

После заточки пластин экспериментальную фрезу установили на фрезерный станок. Проверку радиального и торцевого биения зубьев по их вершинам по главной режущей кромке осуществляли с помощью индикаторной головки часового типа с ценой деления 0,005 мм. Измерительный индикатор закрепляли в стандартной стойке, установленной на столе фрезерного станка. Измерение биения зубьев по вершинам и главной режущей кромке выполнялись при каждом повороте пластины на необходимый задний угол (рис. 3).

Показаны результаты проверки радиального и торцевого биения зубьев экспериментальной фрезы перед проведением опытов (табл. 1).



Рис. 3. Измерение радиального и торцевого биения зубьев
Fig. 3 Measurement of radial and face runout of teeth

Таблица 1. Результаты измерений радиального и торцевого биения зубьев

Table 1. Results of measurements of radial and face run out of teeth

Угол заточки пластин, град.	Радиальное биение / торцевое биение, мкм
0	-25/5
-2	10/-20
-4	-15/10
-6	30/15
-8	25/-10
-10	30/15
-12	20/20
-14	30/-5

Приспособление для создания регулируемой пониженной жесткости заготовки

Предварительные опыты фрезерования стандартной фрезой диаметром 125 мм, числом зубьев 10 на горизонтально-фрезерном станке модели 6М82 показали, что возбуждение автоколебаний в технологической системе происходит при работе с большими глубинами резания [16]. Для доказательства явления гашения автоколебаний принято решение исследовать

процесс обработки нежестких заготовок, где возникновение автоколебаний происходит при небольших глубинах резания [17]. Для имитации нежесткой заготовки создано П-образное приспособление (рис. 4).

Приспособление состоит из четырех упругих пластин 6, соединенных между собой базовой пластиной 7 при помощи винтов 8. Заготовка 1 крепится болтами 2 к базовой пластине. Затем приспособление устанавливается в тисы 5, между пластинами 6 вставляются цилиндрические проставки 9. Вылет державки приспособления $L_{\text{заг}}$, т. е. расстояние от торца базовой пластины 7 до торца тисов 5, регулируется путем разжатия губок тисов, при этом приспособление свободно перемещается вдоль поперечной подачи станка. В данном случае вылет державки настроен на расстояние 100 мм.

Описание конструкции

Приспособление представлено упругой П-образной державкой, закрепленной в станочных тисах. Державка состоит из четырех упругих пластин толщиной 6,5 мм, шириной 90 мм и длиной 400 мм, соединенных опорной пла-

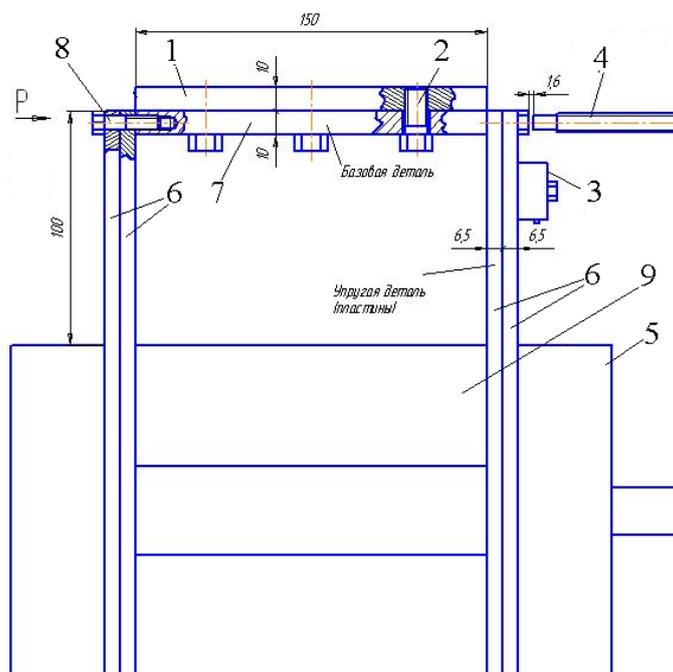


Рис. 4. Схема П-образного приспособления:

1 – заготовка; 2 – болт; 3 – пьезоэлектрический датчик; 4 – токовихревой датчик; 5 – тисы; 6 – упругие пластины; 7 – базовая пластина; 8 – винт; 9 – цилиндрическая проставка

Fig. 4. Diagram of a U-shaped device:

1 – blank; 2 – bolt; 3 – piezoelectric sensor; 4 – eddy current sensor; 5 – jaws; 6 – elastic plates; 7 – base plate; 8 – screw; 9 – cylindrical spacer

стиной посредством шести болтов М6 и четырех штифтов. Обрабатываемая заготовка в виде пластины закрепляется на опорной пластине шестью винтами М10.

Заготовка 2 (рис. 5) крепится к П-образному приспособлению 3 шестью болтами М10. Приспособление устанавливается в тисы 7 и притягивается прихватом 6, тисы крепятся на столе фрезерного станка. В отверстие шпинделя устанавливается оправка с фрезой 1. Магнитная стойка 5 с токовихревым датчиком 4, закрепленным с помощью изоленты, устанавливается на стол станка таким образом, чтобы зазор между датчиком и приспособлением составил 1,6 мм. Зазор выставляется с помощью щупа. Токовихревой датчик подключается к модулю ZET LAB 210, который соединен с персональным компью-

тером, для вывода данных на экран монитора и их обработки. Модуль обработки и сбора данных ZETLab210 представлен на рис. 6. ZETLab210 – это аналого-цифровой преобразователь предназначенный для измерений параметров сигналов с высокой точностью и большим динамическим диапазоном, поступающих с различных первичных преобразователей: термосопротивлений, термопар, датчиков с универсальным токовым выходом 4–20 мА. Так же он предназначен для решения задач измерения и управления в области сейсмоки, вибраций, термометрии, тензометрии и т. д. [14, 15]. Программа из состава ZETLab210 обрабатывает сигналы, поступающие на входные каналы анализаторов спектра, сейсмостанций, тензостанций, плат АЦП ЦАП, интеллектуальных датчиков.



Рис. 5. Настройка оборудования перед началом опытов

Fig. 5. Setting up equipment before starting experiments



Рис. 6. Модуль ZETLab210

Fig. 6. ETLab210 module



Рис. 7. Установка измерения жесткости приспособления:

1 – индикаторная головка; 2 – магнитная стойка; 3 – динамометр; 4 – П-образное приспособление

Fig. 7. Fixture stiffness measurement setting:

1 – indicator head; 2 – magnetic rack; 3 – dynamometer; 4 – U-shaped device

Сигналы на модуль подаются токовихревым бесконтактным датчиком AP2000A (рис. 5, поз. 4) измеряющим динамическое или статическое перемещение объекта относительно места крепления. Измерительная система состоит из бесконтактного датчика, демодулятора (драйвера) и соединительного кабеля. Эти системы используются для измерения радиальной и осевой вибрации, эксцентриситета и осевого перемещения вала, расширения кожуха и разностного расширения и случаев, где должны быть произведены бесконтактные относительные измерения.

Измерение жесткости П-образного устройства

Измерение жесткости П-образного приспособления важно для расчета режимов резания при полуступовом фрезеровании [18]. Измерение жесткости под нагрузкой осуществля-

ли с помощью индикаторной головки 1 часового типа с ценой деления 0,01 мм и образцового динамометра 3 сжатия ДОС М-3-03 системы Токарева. В направлении поперечной подачи нагружали и разгружали ступенчато П-образную державку (рис. 7). Результаты измерения жесткости приведены в табл. 2. Построен график нагрузки и разгрузки (рис. 8).

Жесткость приспособления составила:

$$J = \frac{P}{\Delta},$$

$$J = \frac{250}{0,53} = 4716981 \text{ Н/м}.$$

Результаты экспериментов резания режущих пластин с разным значением заднего угла

Режущие пластины экспериментальной фрезы были заточены восемью способами согласно табл. 1. Для оптимального заднего угла

Таблица 2. Результаты измерений жесткости приспособления
Table 2. Fixture stiffness measurement results

Смещение Δ , мм	P, Н										
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Нагрузка 1	0	0,05	0,1	0,16	0,22	0,28	0,34	0,41	0,48	0,54	0,62
Разгрузка 1	0,02	0,09	0,15	0,22	0,29	0,35	0,41	0,47	0,53	0,58	0,62
Нагрузка 2	0	0,05	0,11	0,17	0,23	0,29	0,35	0,42	0,48	0,55	0,62
Разгрузка 2	0,02	0,08	0,15	0,21	0,28	0,33	0,4	0,46	0,52	0,58	0,62
Нагрузка 3	0	0,05	0,1	0,17	0,23	0,29	0,35	0,41	0,48	0,55	0,62
Разгрузка 3	0,01	0,07	0,14	0,2	0,27	0,33	0,4	0,46	0,52	0,57	0,62

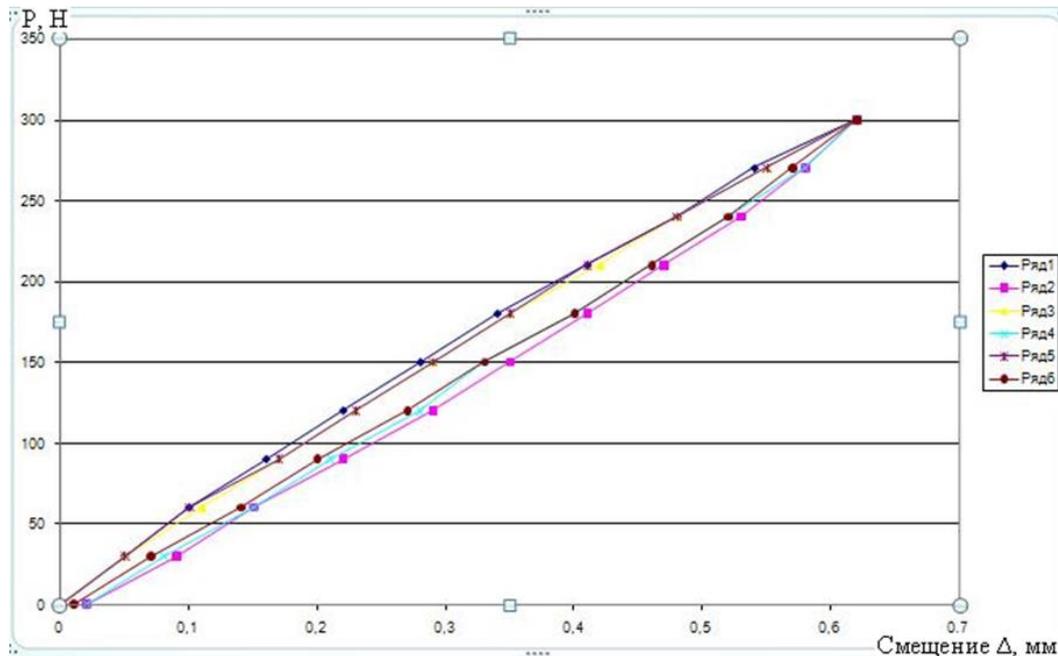


Рис. 8. График нагрузки и разгрузки П-образной державки
Fig. 8. Graph of loading and unloading of the U-shaped holder

заготовку обрабатывали режущими пластинами с разным задним углом в условиях, аналогичных обработке заготовки стандартными пла-

стинами. Получены виброграммы, спектрограммы токовихревого датчика и поверхность обработанной заготовки (рис. 9–11).

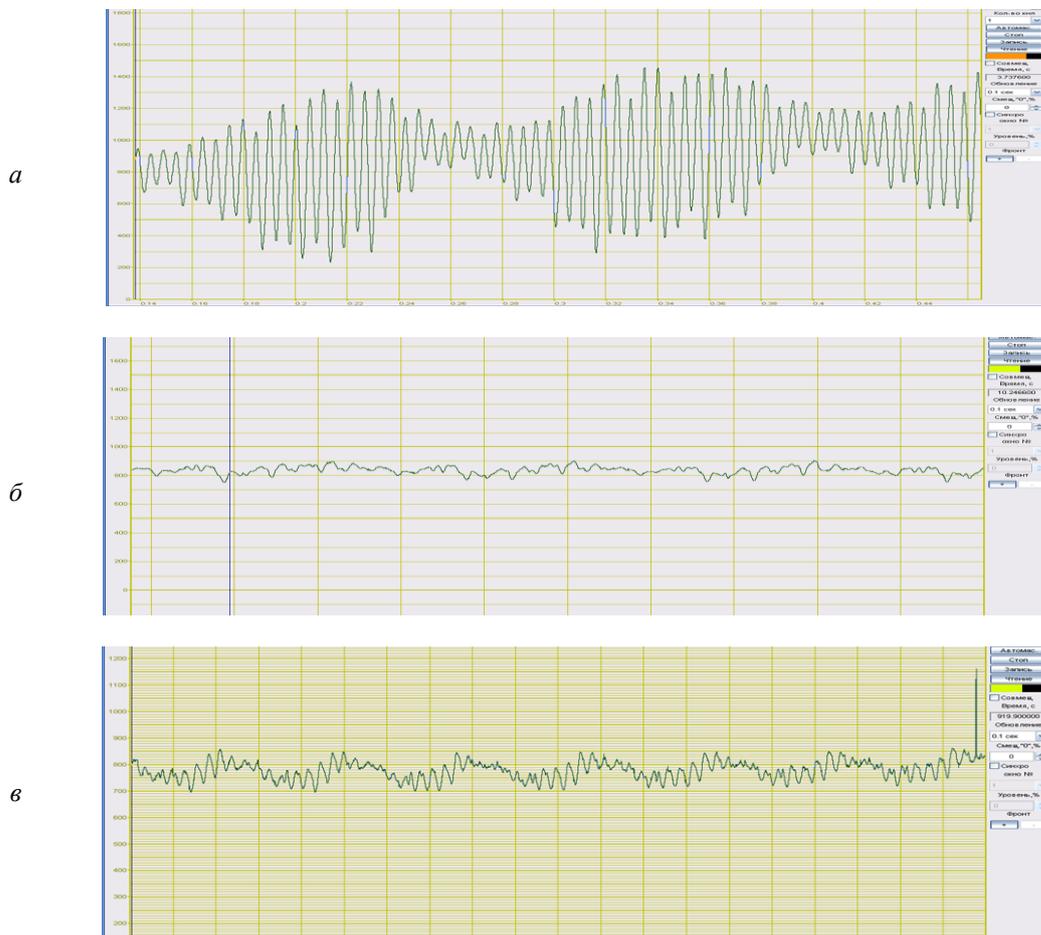
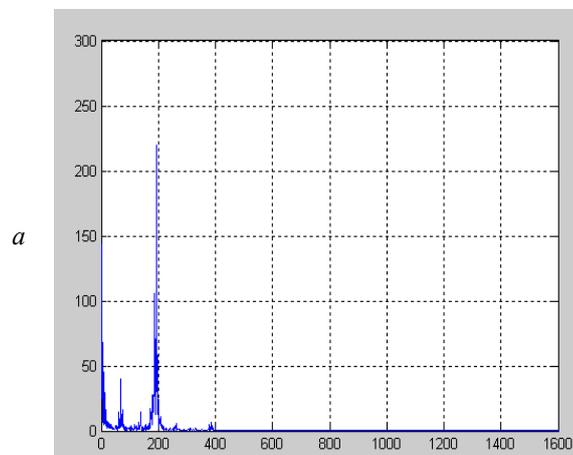


Рис. 9. Виброграммы колебаний заготовки при обработке экспериментальными пластинами с отрицательным задним углом:

a – (0°); *б* – (-8°); *в* – (-14°)

Fig. 9. Vibrograms of the workpiece vibrations during processing with experimental plates with a negative clearance angle:

a – (0°); *b* – (-8°); *c* – (-14°)



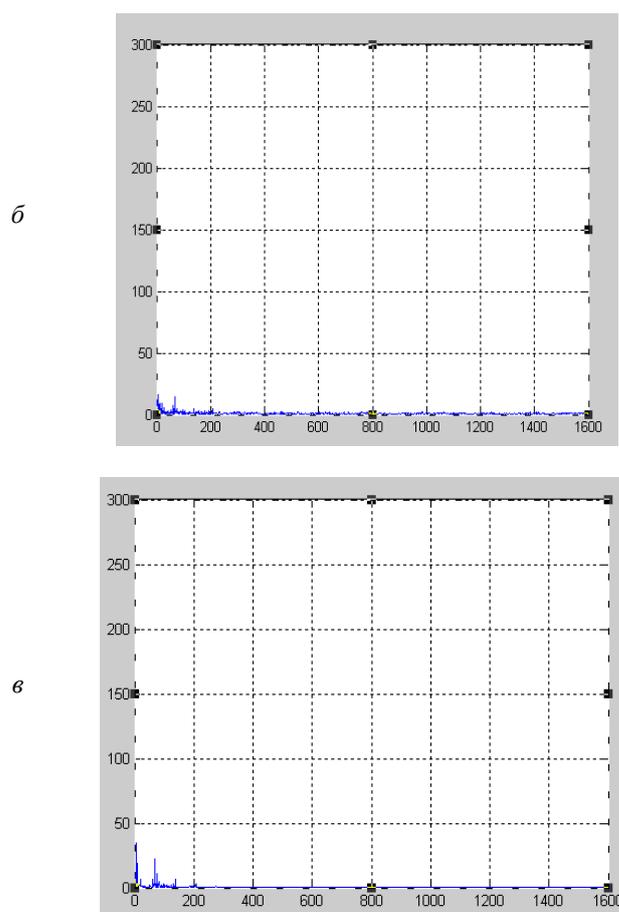


Рис. 10. Спектрограммы колебаний заготовки при обработке экспериментальными пластинами с отрицательным задним углом:
 $a - (0^\circ)$; $б - (-8^\circ)$; $в - (-14^\circ)$

Fig. 10. Spectrograms of billet vibrations during processing with experimental plates with negative clearance angle:
 $a - (0^\circ)$; $b - (-8^\circ)$; $c - (-14^\circ)$



Рис. 11. Обработанная поверхность заготовки экспериментальными пластинами с отрицательным задним углом:
 $a - (0^\circ)$; $б - (-8^\circ)$; $в - (-14^\circ)$

Fig. 11. The processed surface of the work piece with experimental plates with a negative clearance angle
 $a - (0^\circ)$; $b - (-8^\circ)$; $c - (-14^\circ)$

По спектрограммам и виброграммам была составлена таблица амплитуды вынужденных колебаний заготовки и автоколебаний, а также частоты колебаний в зависимости от угла заточки пластин (табл. 3). На основании полученных результатов был построен график зависимости амплитуды колебаний от угла заточки пластин (рис. 12).

Выбор конструктивных параметров приспособления

Расчет П-образной державки заготовки для торцового фрезерования в условиях пониженной жесткости технологической системы представлен ниже.

Объем материала базовой детали с заготовкой найден по формуле:

$$V_{Д+б} = 0,02 \cdot 0,09 \cdot 0,15 = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Их общая масса составит

$$M_{Д+б} = V_{Д+б} \cdot \rho = 2,7 \cdot 10^{-4} \cdot 7,814 = 2,11 \cdot 10^{-3} \text{ т} = 2,11 \text{ кг}.$$

Объем одной пружины

$$V_{ПР} = 0,0065 \cdot 0,09 \cdot 0,1 = 5,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

При колебании участвует примерно $\frac{1}{3}$

массы консольно защемленной пружины.

$$M_{ПР} = 5,85 \cdot 10^{-5} \cdot 7,814 = 4,57 \cdot 10^{-3} \text{ т} = 0,457 \text{ кг}.$$

Общая приведенная колеблющаяся масса

$$M_{\text{общ}} = M_{Д+б} + \frac{1}{3} \cdot 6 \cdot M_{ПР} = 2,11 + 2 \cdot 0,457 \approx 3,02 \text{ кг}.$$

Жесткость при действии силы P , найденная экспериментально

$$j = 4838710 \text{ Н/м}.$$

Таблица 3. Результаты экспериментов

Table 3. Experimental results

№ опыта	Угол заточки пластин, град.	Амплитуда вынужденных колебаний заготовки		Амплитуда автоколебаний заготовки	
		Амплитуда A , мкм	Частота f , Гц	Амплитуда A , мкм	Частота f , Гц
1	Стандартные пластины	70	69	230	195
2	0	40	69	225	193
3	-2	60	69	80	192
4	-4	40	69	60	193
5	-6	25	65	45	198
6	-8	15	70	3,5	194
7	-10	22	69	1,5	193
9	-12	6	68	1	194
10	-14	22	69	1,5	194



Рис. 12. График зависимости амплитуд колебаний заготовки от угла заточки пластин

Fig. 12. The graph of the dependence of the vibration amplitudes of the work piece on the angle of sharpening of the plates

Частота собственных колебаний

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{j}{M}} = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{4838710}{3,02}} = 201,5 \text{ Гц.}$$

Экспериментально измеренная $f = 151,5 \text{ Гц.}$

Примем $v = 90 \text{ м/мин:}$

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi D} = \frac{1000 \cdot 90}{3,14 \cdot 125} = 229 \text{ об/мин.}$$

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 125 \cdot 229}{1000} = 89,88 \text{ м/мин} = 1,49 \text{ м/с.}$$

Длина волны автоколебаний

$$l = \frac{v}{f} = \frac{1,49}{182,5} = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 8,1 \text{ мм.}$$

Заключение

На основании полученных результатов проведенных экспериментов можно сделать выводы.

Обработка заготовки с применением стандартных пластин сопровождается актив-

ными вибрациями, амплитуда автоколебаний заготовки равна 230 мкм, а вынужденных колебаний 70 мкм. Обработка заготовки экспериментальными пластинами с отрицательным задним углом показала, что с увеличением значения заднего угла амплитуда автоколебаний и вынужденных колебаний заметно уменьшается. По графику (см. рис. 12) видно, что автоколебания заготовки изменились с 230 мкм до 1 мкм, а вынужденные колебания с 70 мкм до 6 мкм. Анализируя полученные результаты можно сказать, что оптимальный отрицательный задний угол заточки пластин равен минус 8°.

Проведенное исследование показало, что предложенный способ является эффективным для подавления автоколебаний, и правильная заточка режущих пластин с отрицательным задним углом позволяет реализовать этот способ.

Для имитации пониженной жесткости обрабатываемой заготовки разработано, изготовлено и испытано приспособление.

Список литературы

1. Хрунев Ю.М., Дыжин В.А. Торцовые фрезы с механическим креплением пластин // *Машиностроитель*. 1986. № 3. С. 20–21.
2. Розенберг А.М. Динамика фрезерования. М.: Советская наука, 1945. 360 с.
3. Шишков В.Д. Неравномерность работы торцовой фрезы // *Станки и инструмент*. 1970. № 7.
4. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и демпфирующего протягивания. Киев: Наукова думка, 1990. 320 с.
5. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
6. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 199 с.
7. Шаламов В.Г. Теоретические основы взаимосвязи параметров инструмента с динамикой фрезерования листовых заготовок: специальность 05.03.01 «Процессы механической и физико-технической обработки, станки и инструмент»: дисс. ... д-ра техн. наук / Шаламов Виктор Георгиевич. Техн. ун-т. Санкт-Петербург, 1992. 344 с.
8. Власов В.В. Подавление автоколебаний при торцовом фрезеровании путем регулирования шага зубьев инструмента: дис. ... магистр. техн. наук. Чита, 2011. 103 с.
9. Дулен, Падке, Ву. Расчет торцевой фрезы с минимальной вибрацией с помощью усовершенствованной модели силы резания // *Труды Американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения*. 1976. № 3. С. 38–41.
10. Косилова А.Г. Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
11. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.
12. Вульф А.М. Резание металлов. М.: Машиностроение, 1973. 496 с.
13. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 303 с.
14. Шишков В.Д. Оптимальное расположение заготовки относительно твердосплавной торцовой фрезы // *Станки и инструмент*. 1969. № 6. 148 с.
15. Клепиков В.В. Бодров А.Н. Технология машиностроения. М.: ФОРУМ, 2008. 864 с.
16. Свинин В.М., Самородов П.А., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю. Исследование нежесткой технологической системы при торцовом фрезеровании инструментом с переменным шагом зубьев // *Системы. Методы. Технологии*. 2016. № 4. С. 39–44.
17. Пузанов Ю.В. Исследование устойчивости движения системы при торцовом фрезеровании: специальность 05.03.01 «Процессы и машины обработки материалов резанием; автоматические линии»: дисс. ... канд. техн. наук / Пузанов Юрий Владимирович. Ленинград: Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина, 1980. 240 с.
18. Хае Г.Л. [и др.]. Сборный твердосплавный инструмент. М.: Машиностроение, 1989. 256 с.

References

1. Khruney Yu.M., Dyzhin V.A. Tortsovye frezy s mekhanicheskim krepleniem plastin [End mills with mechanical fastening of plates]. *Mashinostroitel [Mechanical engineer]*. 1986, no 3, pp. 20–21.

2. Rosenberg, A.M. Dinamika frezerovaniya [Dynamics of milling]. Moscow: Sovetskaya Nauka Publ., 1945. 360 p.
3. Shishkov V.D. Neravnomernost' raboty tortsovoj frezy [Unevenness of the face milling cutter]. *Stanki i instrument [Machine tools and tools]*. 1970, no 7.
4. Rosenberg A.M., Rosenberg O.A. Mekhanika plasticheskogo deformirovaniya v protsessakh rezaniya i dempfirovaniya [Mechanics of plastic deformation in the processes of cutting and damping pulling]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1990. 320 p.
5. Kudinov V.A. Dinamika stankov [Dynamics of machine tools]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967. 359 p.
6. Kedrov S.S. Kolebaniya metallorezhushhikh stankov [Oscillations of metal-cutting machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 199 p.
7. Shalamov V.G. Teoreticheskie osnovy vzaimosvyazi parametrov instrumenta s dinamikoj frezerovaniya listovykh zagotovok [Theoretical foundations of the relationship of tool parameters with the dynamics of milling sheet blanks]. Doctor's thesis, Sankt-Peterburg, Technical University, 1992, 344 p.
8. Vlasov V.V. Podavlenie avtokolebanij pri tortsovom frezerovanii putem regulirovaniya shaga zub'ev instrumenta [Suppression of self-oscillations in face milling by adjusting the pitch of the tool teeth]. Master's thesis. Chita, 2011. 103 p.
9. Doolin, Padke, Wu. Raschet tortsovoj frezy s minimal'noj vibratsiej s pomoshh'yu usovershenstvovannoj modeli sily rezaniya [Calculation of a face mill with minimal vibration using an advanced cutting force model]. *Trudy Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroeniya [Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers. Design and technology of mechanical engineering]*. 1976, no 3, pp. 38–41.
10. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya: v 2 tomakh [Handbook of a mechanical engineer: in 2 volumes]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 496 p.
11. Vasin S.A., Vereshchak A.S., Kushner B.S. Rezanie materialov: Termomekhanicheskij podkhod k sisteme vzaimosvyazey pri rezanii [Cutting materials: Thermomechanical approach to the system of interconnections during cutting]. Moscow: MSTU Publ., 2001. 448 p.
12. Wulf A.M. Rezanie metallov [Metal cutting]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1973. 496 p.
13. Granovskiy G.I., Granovskiy V.G. Rezanie metallov [Metal cutting]. Moscow: Vyschaya shkola, 1985. 303 p.
14. Shishkov V.D. Optimal'noe raspolozhenie zagotovki otnositel'no tverdosplavnoj tortsovoj frezy [Optimal positioning of the workpiece relative to the carbide end mill]. *Stanki i instrument [Machines and tools]*. 1969, no 6. 148 p.
15. Klepikov V.V., Bodrov A.N. Tekhnologiya mashinostroeniya [Mechanical engineering technology]. Moscow: FORUM Publ., 2008. 864 p.
16. Svinin V.M., Samorodov P.A., Lobanov D.V., Skiba V.Yu. Issledovanie nezhestkoj tekhnologicheskoy sistemy pri tortsovom frezerovanii instrumentom s peremennym shagom zub'ev [Investigation of a non-rigid technological system in face milling with a tool with a variable tooth pitch]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*. 2016, no 4, pp. 39–44.
17. Puzanov Yu.V. Issledovanie ustojchivosti dvizheniya sistemy pri tortsovom frezerovanii [Investigation of the stability of the movement of the system during face milling]. Candidate's thesis. Leningrad, Leningrad Polytechnic Institute, 1980, 240 p.
18. Hayot G.L. [and others]. Sbornyj tverdosplavnyj instrument [Prefabricated carbide tool]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1989. 256 p.

Информация об авторах

Четвериков Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры подвижного состава железных дорог, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: serga652008@yandex.ru

Information about the authors

Sergey V. Chetverikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department Rolling Stock of Railways, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: serga652008@yandex.ru