

Исследование нежесткой технологической системы при торцовом фрезеровании инструментом с переменным шагом зубьев

В.М. Свинин^{1 a}, П.А. Самородов^{1 b}, Д.В. Лобанов^{2 c}, В.Ю. Скиба^{3 d}

¹Забайкальский государственный университет, ул. Александро-Заводская 30, Чита, Россия

²Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса 20, Новосибирск, Россия

^asvinin_vm@mail.ru, ^bsamorodov-pavel@mail.ru, ^cmf_nauka@brstu.ru, ^dskeeba_vadim@mail.ru

статья поступила 10.09.2016, принята 17.10.2016

Отражены исследования нежесткой технологической системы при торцовом фрезеровании инструментом с переменным шагом зубьев. Повышение производительности при фрезеровании возможно при обоснованной интенсификации режимов обработки. Реализация этого процесса в недостаточно жестких технологических системах приводит к возбуждению автоколебаний, что резко снижает качественные показатели обработки, стойкость режущего инструмента и долговечность технологического оборудования. Рассмотрен российский и зарубежный опыт использования режущего инструмента с переменным окружным шагом зубьев. Приведен краткий критический обзор исследовательских работ этого направления. Для реализации исследований спроектированы и описаны конструкции экспериментальной фрезы с произвольным регулированием положения ее зубьев и упругого приспособления для крепления обрабатываемой заготовки с возможностью регулирования жесткости в направлении продольной подачи. Неравномерный чередующийся шаг получен путем сдвига четных зубьев фрезы в диапазоне от 0 до 10° с дискретностью 1°. Опыты по фрезерованию стальной заготовки проводили на горизонтально-фрезерном станке. Для измерения колебаний заготовки в процессе фрезерования использовался бесконтактный токовихревой датчик. Сигнал от датчика через аналого-цифровой преобразователь поступал в персональный компьютер. По полученным виброграммам установлены размах колебаний и построены частотные спектры, на основании которых определены частота и амплитуда автоколебаний. Интерпретация и анализ результатов исследований позволили доказать возможность эффективного подавления регенеративных автоколебаний при торцовом фрезеровании нежестких заготовок путем использования разности чередующихся по величине шагов зубьев, соответствующей половине длины волны автоколебаний на поверхности резания.

Ключевые слова: торцовая фреза; нежесткая заготовка; регенеративные автоколебания; переменный шаг зубьев.

Research of non-rigid technological system when face-milling with the tool with differential tooth pitch

V.M. Svinin^{1 a}, P.A. Samorodov^{1 b}, D.V. Lobanov^{2 c}, V.Yu. Skeeba^{3 d}

¹Transbaikal State University; 30 Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, Russia

²Bratsk State University; 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

³Novosibirsk State Technical University; 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, Russia

^asvinin_vm@mail.ru, ^bsamorodov-pavel@mail.ru, ^cmf_nauka@brstu.ru, ^dskeeba_vadim@mail.ru

Received 10.09.2016, accepted 17.10.2016

Research has been done for non-rigid technological systems when face-milling with the tool with differential tooth pitch. Improved performance in milling is possible at a reasonable intensification of processing modes. Implementation of this process in insufficiently rigid technological systems leads to excitation of self-oscillations, which dramatically reduces the quality of processing performance, cutting tool life and durability of the technological equipment. Both Russian and foreign experience has been reviewed for using a cutting tool with differential tooth pitch. Brief critical review of the research in this direction has been presented. To implement the research, experimental mill has been designed and described with arbitrary control position of its teeth and with a resilient unit for a processing blank to be adjusted with a possibility to regulate stiffness in the direction of the longitudinal feed. Uneven striped step has been obtained by shifting the mill teeth even in the range from 0 to 10° in increments of 1°. Experiments on milling steel billets have been carried out on a horizontal milling machine. To measure the vibrations in blanks when milling, contactless eddy-current sensor has been used. The signal from the sensor has been sent into a PC via an analog-digital converter. The vibrogrammes obtained have allowed setting the fluctuation and constructing frequency spectra, which in turns have helped to define frequency and amplitude of oscillations. Interpretation and analysis of research results have allowed proving the possibility of effective suppression of regenerative self-oscillations when face-milling non-rigid blanks by applying the difference between the alternating different tooth pitch, corresponding to the half-length of the wave of self-oscillations in the cutting surface.

Key words: face-milling cutter; non-rigid blank; regenerative self-oscillations; differential tooth pitch.

Введение

Одним из резервов повышения производительности технологических процессов изготовления изделий на технологическом оборудовании в машиностроении является интенсификация режимов обработки. Однако реализация этого процесса, особенно в недостаточно жестких технологических системах, негативно влияет на производительность процесса, приводит к возбуждению автоколебаний, резко снижающих качественные показатели обработки, стойкость режущего инструмента и долговечность технологического оборудования. Таким образом, исследование способов подавления автоколебаний без снижения производительности обработки представляет актуальную задачу современной металлообработки.

Торцовое фрезерование как способ механической обработки заготовок широко применяется в различных отраслях машиностроения. Одним из способов снижения автоколебательных процессов при торцовом фрезеровании является использование режущего инструмента с переменным окружным шагом зубьев. В практике отечественного машиностроения этот способ стали применять станочники-новаторы, начиная с 50-х гг. прошлого века [1]. В настоящее время ведущая инструментальная фирма Sandvik Coromant предлагает потребителям широкий набор торцовых и концевых фрез с нерегулярным шагом зубьев [2]. Однако такие фрезы обеспечивают уверенное подавление автоколебаний только для определенных узких областей скорости резания, что сдерживает их промышленное применение. Потребность расширения области эффективного использования этих фрез обуславливает необходимость совершенствования их конструкций на основе изучения динамики работы.

Повышением динамической устойчивости фрезерования на основе применения инструмента с нерегулярным шагом зубьев занимались и за рубежом. В ранних работах авторов [3–5] рассмотрены условия подавления автоколебаний при вариации двух соседних шагов зубьев, а в дальнейшем — увеличения количества рассматриваемых шагов. Во всех исследованиях использовали альтернативный, по западной терминологии, вариант изменения шага зубьев с последовательным чередованием больших и меньших шагов. При этом разность шагов соответствовала половине длины волны автоколебаний на поверхности резания. Кроме того, в работах авторов [6; 7], исследовавших динамическую устойчивость фрез, имевших линейный характер изменения шага зубьев (его постепенное нарастание с одинаковым приращением), показано, что при выборе разности шага концевой фрезы в половину длины волны автоколебаний линейная вариация более эффективна, чем альтернативная, а в работе [8] предложен выбор непостоянного шага зубьев для определенной скорости резания. В последние годы внимание исследователей концентрировалось на обеспечении динамической ус-

тойчивости фрез путем варьирования шага и угла наклона винтовых зубьев [9–15].

В связи с большой трудоемкостью изготовления инструмента с переменным шагом зубьев упомянутые исследования проводили преимущественно теоретическим путем — строили диаграммы устойчивости технологической системы в координатах осевой глубины резания и частоты вращения шпинделя на основе моделирования динамики процесса фрезерования в частотной и временных областях. Используемые авторами различные методики моделирования обеспечили результаты, точность которых определяется степенью идеализации рассматриваемого процесса. Более точные результаты дают опыты по резанию, что обуславливает необходимость проведения экспериментальных исследований работы фрез с изменяемым шагом зубьев.

Рекомендации по выбору разности шагов соседних зубьев инструмента теоретически обоснованы в работе автора [16]: для назначенной скорости резания она должна составлять половину длины волны автоколебаний. Позже эти рекомендации развил в своих работах автор [17], согласно которому разность шагов может составлять половину, полторы, две с половиной и т. д. длины волны. Однако из ряда этих значений наиболее эффективно первое.

Влияние количества расположенных на поверхности резания между соседними зубьями волн автоколебаний на их возбуждение связано с природой регенеративного эффекта [18] и иллюстрируется диаграммой динамической устойчивости, впервые предложенной в работе [19]. Согласно этой диаграмме наиболее сильное возбуждение автоколебаний происходит в том случае, когда их количество имеет дробный остаток, равный 0,75 длины волны. Подавлению автоколебаний соответствует остаток в 0,25 волны. В этой связи управление динамикой процесса резания заключается в выборе соответствующей скорости резания или величины шага зубьев инструмента.

Из проведенного обзора видно, что подавление автоколебаний переменным шагом зубьев исследовали преимущественно для концевых фрез, а для торцовых фрез этот вопрос изучен недостаточно. В этой связи целью представленного ниже исследования является определение опытным путем влияния переменного шага зубьев торцовой фрезы на динамику технологической системы, имеющей пониженную жесткость в направлении подачи.

Методика проведения исследований. Для проведения исследования была спроектирована и изготовлена специальная оснастка: торцовая фреза с произвольным регулированием шага зубьев и приспособление, позволяющее изменять жесткость обрабатываемой заготовки в направлениях подачи.

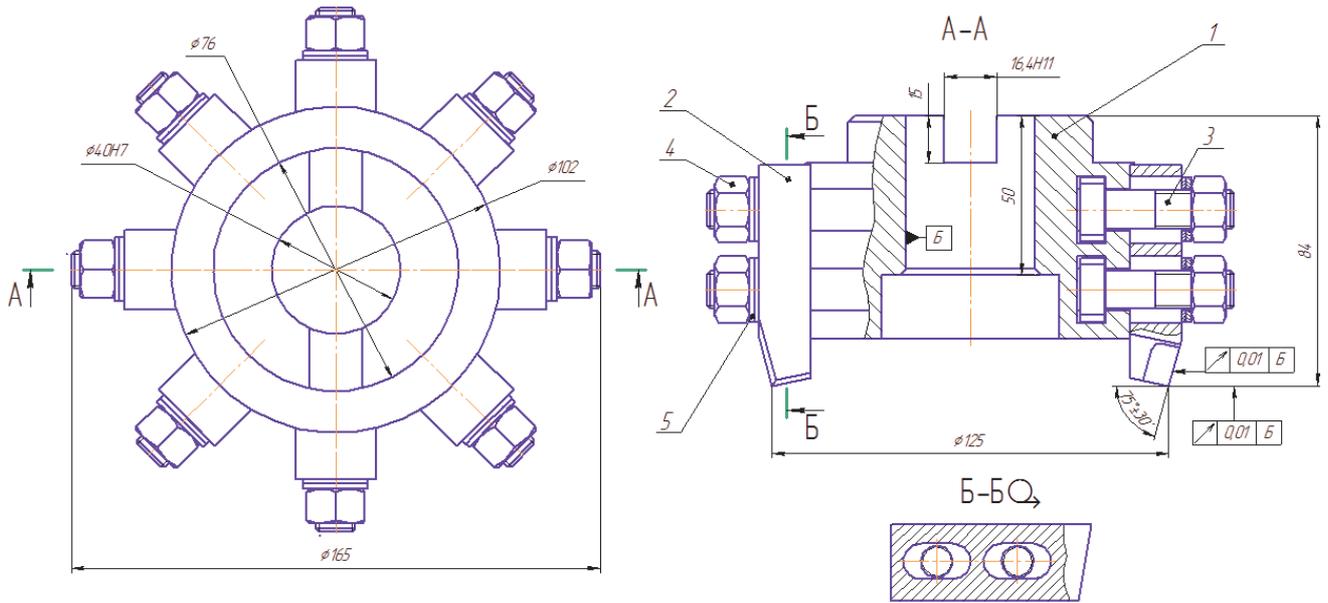


Рис. 1. Торцовая фреза с регулируемым шагом зубьев

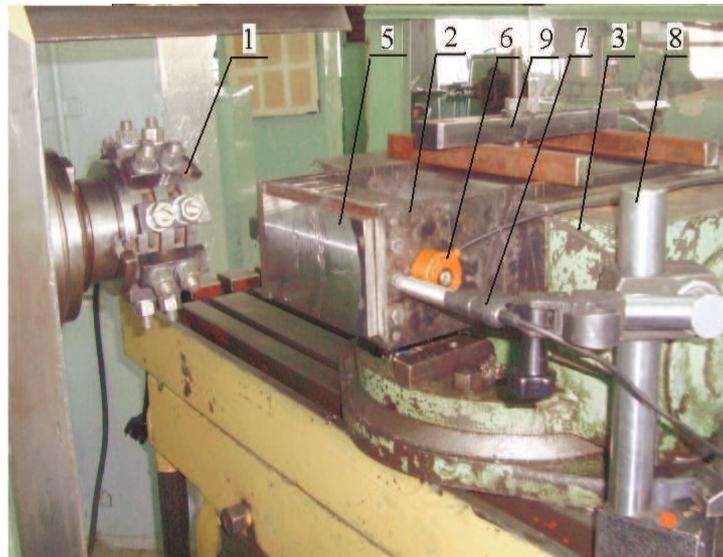


Рис. 2. Экспериментальная установка: 1 — торцовая фреза с регулируемым шагом зубьев; 2 — упругая П-образная державка; 3 — тисы станочные; 4 — гайки; 5 — шайбы; 6 — пьезоэлектрический датчик ускорения; 7 — токовихревой датчик перемещения; 8 — магнитная стойка

Экспериментальная фреза диаметром $D = 125$ мм (рис. 1) имеет корпус 1, на цилиндрической периферийной части которого выполнены два Т-образных паза. В пазы вставлены головки болтов 3, крепящих восемь резцов 2 с помощью гаек 4. Шайбы 5 служат для обеспечения плотного контакта гаек и резцов. Зубья фрезы, оснащенные пластинками из твердого сплава Т5К10, заточены с точностью до 1° согласно рекомендациям работы [20] со следующими геометрическими параметрами: $\varphi = 75^\circ$; $\gamma = -5^\circ$; $\gamma_{oc} = -15^\circ 30'$; $\gamma_{п} = -3^\circ 25'$; $\alpha = 16^\circ$; $\lambda = 15^\circ$. Настройку углового положения зубьев с погрешностью не более $0,25^\circ$ проводили на оптической делительной головке мод. ОДГ-2 с использованием штангенрейсмаса и жесткого упора. Фактическая величина биения настроенных зубьев не превышала 0,03 мм

в радиальном направлении и 0,05 мм в осевом направлении при допустимом значении 0,05–0,1 мм [20, 21].

Предварительные опыты по фрезерованию жесткой стальной заготовки стандартной торцовой фрезой на горизонтально-фрезерном станке мод. 6М82 показали, что возбуждение автоколебаний в технологической системе происходит при работе с глубинами резания более 7–8 мм. С целью экономии обрабатываемого материала было принято решение исследовать процесс обработки нежестких заготовок, у которых возникновение автоколебаний происходит при небольших глубинах резания. Это потребовало разработки специального приспособления, создающего нежесткость заготовки. Наиболее простым конструктивным решением является упругая П-образная державка, закрепляемая в тисах (рис. 2). На полке державки болтами закреплена

заготовка из стали 45 (HB = 207) размером 150×90×10 мм. Регулировку жесткости приспособления в направлении подачи выполняли изменением вылета державки из тисов.

Опыты по обработке нежестких заготовок фрезой с переменным шагом зубьев проводили на горизонтально-фрезерном станке мод. 6М82 на следующем режиме резания: $n = 400$ об/мин, $S_{\text{мин}} = 500$ мм/мин, $t = 2$ мм, $B = 90$ мм. Фрезерование встречное симметричное без применения СОЖ. Действительная частота вращения шпинделя (измеренная с помощью токовихревого датчика, установленного напротив зубьев фрезы) составила $n = 419,58$ об/мин, а действительная скорость резания — $V = 164,77$ м/мин = 2,746 м/с. Для создания чередующегося переменного шага четные зубья фрезы сдвигали в одном направлении относительно их равномерного расположения на величину от 0 до 10° с дискретностью 1°, а угловое положение нечетных зубьев оставалось неизменным. Таким образом было проведено 11 опытов. Каждый опыт повторяли три раза. Порядок проведения опытов рандомизировали. При проведении опытов вылет из тисов П-образной державки с закрепленной заготовкой составил 140 мм, а собственная частота колебаний в направлении подачи — 151 Гц.

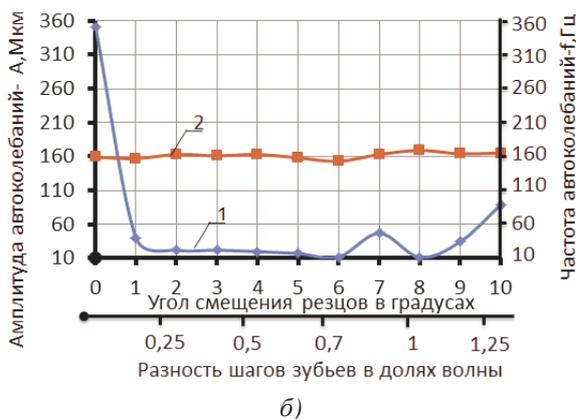


Рис. 3. Влияние углового смещения четных зубьев на размах R колебаний заготовки (а), амплитуду A (1) и частоту f (2) ее автоколебаний (б)

Создание разности соседних шагов зубьев сразу привело к снижению интенсивности колебательного движения (рис. 3). Лучшие результаты получены при

смещении четных зубьев в диапазоне от 3 до 6°: размах колебаний с 1 700 мкм уменьшился в среднем до 288 мкм, то есть в 6 раз; а амплитуда доминирующей гармоники понизилась в среднем от 352 мкм до 18 мкм, то есть в 20 раз (рис. 3 б). Подавление автоколебаний выразилось в уменьшении глубины их следов на поверхности резания и улучшении качества обработанной поверхности. Частота автоколебаний с увеличением разности шагов зубьев также подвергалась небольшим изменениям (рис. 3 б).

Полученные в опытах результаты можно объяснить с позиции теории регенеративных автоколебаний [18]. Их развитие и поддержание происходит вследствие самоорганизации путем подстройки фазы текущих колебаний к фазе вибрационного следа на поверхности резания. С установлением разности фаз +90° такая подстройка происходит в течение одного-двух колебаний после встречи зуба с вибрационным следом на поверхности резания от предыдущего зуба. В условиях наших опытов при равномерном расположении зубьев частота автоколебаний составляет 159 Гц. При скорости резания $V = 2,746$ м/с длина волны автоколебаний составляет $l = \frac{V}{f} = 17,271$ мм. При равномерном расположении

восьми зубьев расстояние между ними составляет $L = \frac{\pi D}{z} = \frac{3,14 \cdot 125}{8} = 49,087$ мм. Тогда на поверхности резания между зубьями располагается количество волн $n = \frac{L}{l} = 2,84$. Из теории регенеративных автоколебаний известно, что если дробный остаток числа волн автоколебаний равен 0,75, что соответствует начальному сдвигу фаз 270° (+90°), то происходит усиление автоколебаний. При дробном остатке 0,25, соответствующем начальному сдвигу фаз -90°, происходит гашение автоколебаний. При дробном остатке 0 (1) или 0,5 начальный сдвиг фаз соответствует 0° и 180°. Эти последние два значения начального сдвига фаз являются индифферентными к возбуждению и гашению автоколебаний.

В нашем случае при равном расположении зубьев дробный остаток 0,84 близок к значению 0,75, что способствует возбуждению автоколебаний. То есть, системе почти не нужно подстраиваться под колебания следа, и автоколебания свободно развиваются до амплитуды 352 мкм. При смещении зубьев, как видно на графике (рис. 3 б), происходит почти полное гашение автоколебаний. Это можно объяснить следующим образом. При смещении четных зубьев на четверть длины волны автоколебаний, что составляет по углу примерно 4°, разность соседних шагов зубьев составляет половину длины волны. Колебания смежных зубьев в этом случае должны происходить в противофазе, что невозможно из-за их нахождения на общем корпусе. Кроме того, начальные сдвиги фаз имеют значения, близкие к 0 и 0,5. Действительно, расстояние между зубьями № 1

и 2 равно $49,087 + 4,318 = 53,405$ мм, а расстояние между зубьями № 2 и 3 равно $49,087 - 4,318 = 44,769$ мм. Количество волн автоколебаний между зубьями № 1 и 2 составляет $n = \frac{53,405}{17,271} = 3,09$. Количество волн меж-

ду зубьями № 2 и 3 равно $n = \frac{44,769}{17,271} = 2,59$.

При разности соседних шагов, равной длине одной волны автоколебаний, смещение зубьев составляет 8° , и автоколебания должны возрастать. Однако, как видно на графике (рис 3 б), и в этом случае происходит гашение автоколебаний. Это объясняется действием величины начального сдвига фаз. Расстояние между зубьями № 1 и 2 равно $49,087 + 4,318 \times 2 = 57,723$ мм, расстояние между зубьями № 2 и 3 равно $49,087 - 4,310 \times 2 = 40,451$ мм. Количество волн автоколебаний между зубьями № 1 и 2 составляет $n = \frac{57,723}{17,271} = 3,34$, а между

зубьями № 2 и 3 равно $n = \frac{40,451}{17,271} = 2,34$.

Дробные остатки 0,34 близки к значениям 0,25 (начальный сдвиг фаз $+90^\circ$), что приводит к гашению автоколебаний. Кроме того, в этом случае гашению автоколебаний способствует несинхронность переходных процессов смежных зубьев. Гашение автоколебаний при других значениях смещения четных зубьев можно рассматривать как следствие совокупного действия вышеописанных факторов. Для практического использования фрез с неравномерным шагом длину волны их автоколебаний можно измерять на поверхности резания заготовки, а смещение четных зубьев относительно нечетных выполнять равным длине четверти их волны.

Выводы

Анализируя результаты исследований, следует отметить, что настройка использованного в опытах инструмента отличается большой трудоемкостью, особенно достижение допустимой величины биения зубьев. В этой связи возникает задача создания удобной для использования в промышленности конструкции торцовой фрезы с регулируемым положением зубьев. В качестве первого опыта в этом направлении можно отметить конструкцию, описанную в работе [22].

Интерпретация результатов исследования позволила экспериментально доказать возможность эффективного подавления регенеративных автоколебаний при торцовом фрезеровании нежестких заготовок путем использования разности чередующихся по величине шагов зубьев, соответствующей половине длины волны автоколебаний на поверхности резания. Для промышленного применения этого способа требуется разработка специальной конструкции торцовой фрезы.

Литература

1. Дыков А.Т., Ясинский Г.И. Прогрессивный режущий инструмент в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1972. 224 с.
2. Вращающиеся инструменты [Электронный ресурс]. Каталог 2015 г. Фирмы SandvikCoromant. URL: <http://sandvikcoromant.ru/doc/2015-katalog-vraschayuschiesya-instrumenty.html> (дата обращения: 26.03.2016).
3. Slavicek J. The Effect of Irregular Tooth Pitch on Stability of Milling // Proceedings of the 6th MTDR Conference, Pergamon Press. London, 1965. P.15–22.
4. Opitz H., Dregger E.U., Roese H. Improvement of the Dynamic Stability of the Milling Process by Irregular Tooth Pitch, Proceedings of the Adv // MTDR Conference, 1966. № 7. P. 213–227.
5. Vanherck P. Increasing Milling Machine Productivity by Use of Cutters with Non-Constant Cutting Edge Pitch, 8th MTDR Conference // Manchester, 1967. P. 947–960.
6. Tlusty J., Ismail F., Zaton W. Use of Special Milling Cutters Against Chatter, NAMRC 11// University of Wisconsin, SME, 1983. P. 408–415.
7. Budak E. An analytical design method for milling cutters with nonconstant pitch to increase stability, part I: theory, part 2: application, ASME // J. Manuf. Sci. Eng. 2003. Vol. 125, № 1. P. 29–38.
8. Altintas Y., Engin S., Budak E. Analytical Stability Prediction and Design of Variable Pitch Cutters, ASME // J. Manuf. Sci. Eng. 1999. Vol. 121, № 2. P. 173–178.
9. Suzuki N., Kojima T., Hino R., Shamoto E. A Novel Design Method of Irregular Pitch Cutters to Attain Simultaneous Suppression of Multi-Mode Regenerations // Procedia CIRP. 2012. Vol. 4. P. 98-102. doi: 10.1016/j.procir.2012.10.018.
10. Yang D., Liu Z. Surface plastic deformation and surface topography prediction in peripheral milling with variable pitch end mill // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015. Vol. 91. P. 43-53. doi: 10.1016/j.ijmactools.2014.11.009.
11. Shamoto E., Saito A. A novel deep groove machining method utilizing variable-pitch end mill with feed-directional thin support // Precision Engineering. 2016. Vol. 43. P. 277-284. doi: 10.1016/j.precisioneng.2015.08.006.
12. Sims N.D., Mann B., Huyanan S. Analytical prediction of chatter stability for variable pitch and variable helix milling tools // Journal of Sound and Vibration. 2008. Vol. 317, № 3-5. P. 664-686. doi: 10.1016/j.jsv.2008.03.045.
13. Sims N.D. Fast chatter stability prediction for variable helix milling tools // Proceedings of the institution of mechanical engineers part C - Journal of mechanical engineering science. 2016. Vol. 230, № 1. P.133-144. DOI: 10.1177/0954406215585367.
14. Wang Y., Wang T.Y., Yu Z.Q., Zhang Y., Wang Y.L., Liu H.L. Chatter Prediction for Variable Pitch and Variable Helix Milling // Shock and vibration. 2015. Art. 419172. DOI: 10.1155/2015/419172.
15. Jin G., Zhang Q.C., Hao S.Y., Xie Q.Z. Stability Prediction of Milling Process with Variable Pitch Cutter // Mathematical problems in engineering. 2013. Art. 932013. DOI: 10.1155/2013/932013.
16. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 199 с.
17. Шаламов В.Г. Теоретические основы взаимосвязи параметров инструмента с динамикой фрезерования листовых заготовок: дис. ... д-ра. техн. наук. Челябинск, 1990. 344 с.
18. Свинин В.М. Самоорганизация вторичных автоколебаний при лезвийной обработке // СТИН. 2006. № 1. С. 7-13.

19. Merritt H.E. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter, ASME // J. Eng. Indus., 1965. Vol. 87, P. 447-454.

20. Шатин В.П., Шатин Ю.В. Справочник конструктора - инструментальщика. М.: Машиностроение, 1975. 456 с.

21. Справочник инструментальщика / под ред. И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 846 с.

22. Свинин В.М. Виброустойчивая торцовая фреза для работы с модулированной скоростью резания // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2008. № 1(38). С. 33-35.

References

1. Dykov A.T., Yasinskii G.I. Progressive cutting tools in mechanical engineering. L.: Mashinostroenie, 1972. 224 p.

2. Rotating tools [Elektronnyi resurs]. Katalog 2015 g. Firmy SandvikCoromant. URL: <http://sandvik-coromant.ru/doc/2015-katalog-vraschayuschiesya-instrumenty.html> (data obrashcheniya: 26.03.2016).

3. Slavicek J. The Effect of Irregular Tooth Pitch on Stability of Milling // Proceedings of the 6th MTDR Conference, Pergamon Press. London, 1965. P. 15-22.

4. Opitz H., Dregger E.U., Roese H. Improvement of the Dynamic Stability of the Milling Process by Irregular Tooth Pitch, Proceedings of the Adv // MTDR Conference, 1966. № 7. P. 213-227.

5. Vanherck P. Increasing Milling Machine Productivity by Use of Cutters with Non-Constant Cutting Edge Pitch, 8th MTDR Conference // Manchester, 1967. P. 947-960.

6. Tlustý J., Ismail F., Zaton W. Use of Special Milling Cutters Against Chatter, NAMRC 11// University of Wisconsin, SME, 1983. P. 40-415.

7. Budak E. An analytical design method for milling cutters with nonconstant pitch to increase stability, part I: theory, part 2: application, ASME // J. Manuf. Sci. Eng. 2003. Vol. 125, № 1. P. 29-38.

8. Altintas Y., Engin S., Budak E. Analytical Stability Prediction and Design of Variable Pitch Cutters, ASME // J. Manuf. Sci. Eng. 1999. Vol. 121, № 2. P. 173-178.

9. Suzuki N., Kojima T., Hino R., Shamoto E. A Novel Design Method of Irregular Pitch Cutters to Attain Simultaneous Suppression of Multi-Mode Regenerations // Procedia CIRP. 2012. Vol. 4. P. 98-102. doi: 10.1016/j.procir. 2012.10.018.

10. Yang D., Liu Z. Surface plastic deformation and surface topography prediction in peripheral milling with variable pitch end mill // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015. Vol. 91. P. 43-53. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2014.11.009.

11. Shamoto E., Saito A. A novel deep groove machining method utilizing variable-pitch end mill with feed-directional thin support // Precision Engineering. 2016. Vol. 43. P. 277-284. doi: 10.1016/j.precisioneng. 2015.08.006.

12. Sims N.D., Mann B., Huyanan S. Analytical prediction of chatter stability for variable pitch and variable helix milling tools // Journal of Sound and Vibration. 2008. Vol. 317, № 3-5. P. 664-686. doi: 10.1016/j.jsv. 2008.03.045.

13. Sims N.D. Fast chatter stability prediction for variable helix milling tools // Proceedings of the institution of mechanical engineers part C - Journal of mechanical engineering science. 2016. Vol. 230, № 1. P. 133-144. DOI: 10.1177/0954406215585367.

14. Wang Y., Wang T.Y., Yu Z.Q., Zhang Y., Wang Y.L., Liu H.L. Chatter Prediction for Variable Pitch and Variable Helix Milling // Shock and vibration. 2015. Art. 419172. DOI: 10.1155/2015/419172.

15. Jin G., Zhang Q.C., Hao S.Y., Xie Q.Z. Stability Prediction of Milling Process with Variable Pitch Cutter // Mathematical problems in engineering. 2013. Art. 932013. DOI: 10.1155/2013/932013.

16. Kedrov S.S. Vibrations of machine tools. M.: Mashinostroenie, 1978. 199 p.

17. Shalamov V.G. Theoretical basis of the relationship parameters of the tool with the dynamics of milling sheet blanks: dis. ... d-ra. tekhn. nauk. Chelyabinsk, 1990. 344 p.

18. Svinin V.M. Self-organization of the secondary self-oscillation at blade machining // STIN. 2006. № 1. P. 7-13.

19. Merritt H.E. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter, ASME // J. Eng. Indus., 1965. Vol. 87, P. 447-454.

20. Shatin V.P., Shatin Yu.V. Directory of constructor - toolmaker. M.: Mashinostroenie, 1975. 456 p.

21. Directory toolmaker / pod red. I.A. Ordinartsev, G.V. Filippov, A.N. Shevchenko L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1987. 846 p.

22. Svinin V.M. Vibration resistance face milling cutter for operation with modulating cutting speed // Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science). 2008. № 1 (38). P. 33-35.