



УДК 621.91.01:621.914.1:621.914.22

Анализ условий контактирования зубьев концевой цилиндрической фрезы с деталью

Ю. Н. Внук¹⁾, С. И. Дядя²⁾, Е. Б. Козлова³⁾, Н. Н. Черновол⁴⁾

^{1), 2), 3), 4)} Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

Article info:

Paper received:

The final version of the paper received:

Paper accepted online:

21 January 2015

13 May 2015

18 June 2015

Correspondent Author's Address:

^{1), 2), 3), 4)} yvnukov@zntu.edu.ua

В работе получены теоретические формулы для определения времени резания одним зубом и времени холостого хода, в момент вращения фрезы, когда предыдущий зуб вышел из зоны резания, а последующий еще не вошел. Соотношение этих времен во многом определяет динамические условия процесса фрезерования. Проанализировано влияние размеров и геометрии инструмента, а также режимов фрезерования на время резания одним зубом и время холостого хода. Показано, что при изменении размеров и геометрии фрезы, а также режимов фрезерования отношение времени резания одним зубом к времени холостого хода может увеличиваться (с увеличением наклона винтовой режущей кромки, радиальной и осевой глубин), уменьшаться (с увеличением диаметра фрезы и количества зубьев) или оставаться практически неизменным (с увеличением частоты вращения шпинделя и подачи на зуб). Результаты анализа позволяют целенаправленно изменять условия возбуждения и релаксации колебаний при фрезеровании тонкостенного элемента, если известна его реальная жесткость и величина периода собственных колебаний.

Ключевые слова: тонкостенная деталь, концевая цилиндрическая фреза, время резания одним зубом, анализ времени резания одним зубом.

1. ВВЕДЕНИЕ

Детали, имеющие тонкостенные элементы (лопатки моноколеса компрессора газотурбинного двигателя) широко применяются в авиакосмической и других отраслях промышленности.

Исследованиями [1, 2, 3] установлено, что при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов лопаток возникают вынужденные колебания, связанные с входом и выходом зуба фрезы в деталь. В определенном скоростном диапазоне возникают регенеративные автоколебания, ухудшающие шероховатость обработанной поверхности и точность обработки [4]. Учитывая, что к качеству лопаток моноколес компрессоров газотурбинных двигателей предъявляются высокие требования, необходимо в процессе обработки обеспечивать условия безвибрационного фрезерования, что в значительной мере обуславливается динамикой процесса резания.

При исследовании динамики процесса финишного концевой фрезерования тонкостенного элемента детали необходимо знать время резания, в течении которого один зуб фрезы срезая припуск возбуждает вынужденные колебания элемента и время холостого хода, от выхода предыдущего зуба до входа последующего, в течении которого элемент совершает свободные затухающие колебания.

Соотношение этих времен во многом определяет динамические условия процесса фрезерования, уровень возникающих вибраций, а, следовательно, и

качество рабочих поверхностей лопаток. Поэтому решение проблемы обеспечения условий безвибрационного фрезерования путем управления соотношением этих времен является задачей актуальной и своевременной.

Целью данной статьи является определение условий контактирования зубьев концевой цилиндрической фрезы со срезаемым слоем, а также анализ времени резания одним зубом и времени холостого хода при концевом цилиндрическом фрезеровании в зависимости от: диаметра фрезы d , мм; количества зубьев z ; угла наклона винтовой режущей кромки ω ; радиальной глубины резания a_e , мм; осевой глубины резания a_p , мм; подачи на зуб S_z , мм/зуб и частоты вращения шпинделя n , об/мин.

2. ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ

Основной задачей при определении времени резания одним зубом является нахождение длины дуги по окружности фрезы, на которой режущая кромка одного зуба контактирует с поверхностью резания. Схема для определения длины резания одним зубом при концевом цилиндрическом фрезеровании и схема развертки поверхности резания приведены на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

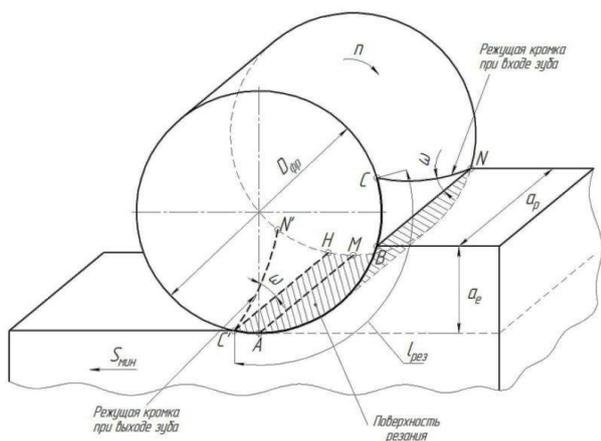


Рис. 1. Схема для определения длины дуги по окружности фрезы, на которой режущая кромка одного зуба контактирует с поверхностью резания

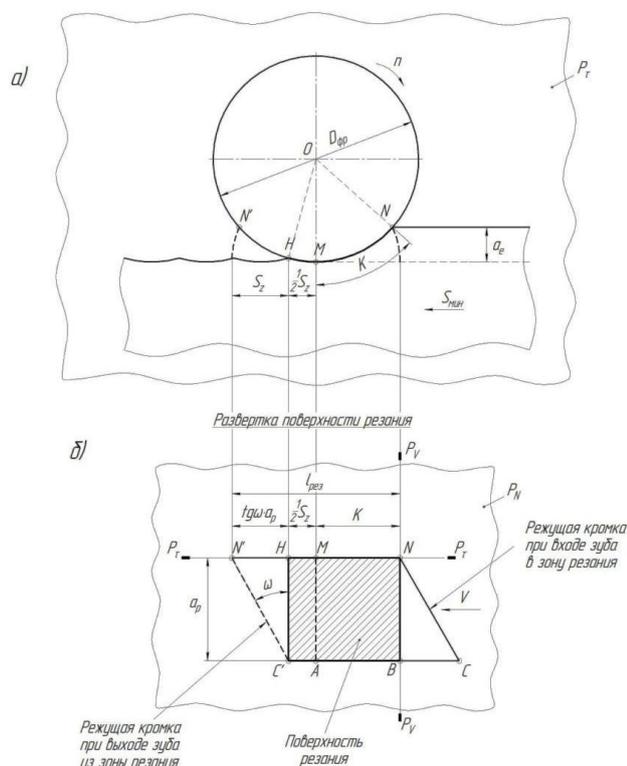


Рис. 2. Схема развертки поверхности резания:

а) в главной секущей плоскости – P_τ ; б) в плоскости резания – P_v

Время резания одним зубом можно определить по формуле (1):

$$\tau_{рез} = \frac{l_{рез} \cdot 60}{\pi \cdot d \cdot n}, \quad (1)$$

где $l_{рез}$ – длина дуги по окружности фрезы, на которой режущая кромка одного зуба контактирует с поверхностью резания; d – диаметр фрезы; n – частота вращения шпинделя станка.

Определение длины дуги по окружности фрезы, на которой режущая кромка одного зуба контактирует с поверхностью резания, показано на рис. 2 и 3. Длина дуги $N'H$ состоит из расстояния $N'H$, образо-

ванного углом наклона винтовой режущей кромки и величиной осевой глубины a_p , отрезков $HM = \frac{1}{2}S_z$ и MN , примерно (ввиду относительной «малости» контакта зуба со срезаемым слоем при чистовой обработке) равного длине дуги K .

$$l_{рез} = K + \frac{1}{2}S_z + N'H. \quad (2)$$

Находим величину дуги K в зависимости от a_e из подобия отношения длин окружности и сегмента OMN к их площадям по формуле:

$$\frac{K}{S} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\pi \cdot r^2}, K = \frac{2 \cdot S}{r}, \quad (3)$$

где S – площадь сегмента OMN ; $\pi \cdot r^2$ – площадь окружности; $2 \cdot \pi \cdot r$ – длина окружности.

Для нахождения площади сегмента OMN составим уравнение окружности, диаметр которой равен диаметру фрезы (рис. 3) по формуле:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2, \quad (4)$$

где (a, b) – координаты центра окружности; r – радиус окружности.

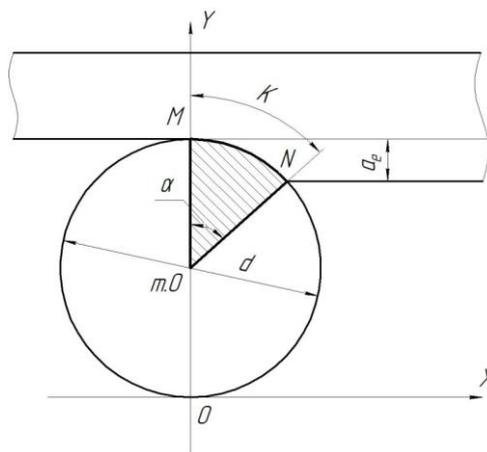


Рис. 3. Схема для определения величины дуги K

По формуле (4) составляем уравнение окружности с центром в точке $(0, r)$:

$$\begin{aligned} x^2 + (y-r)^2 &= r^2, \\ x^2 &= r^2 - (y-r)^2, \\ x &= \sqrt{r^2 - (y-r)^2}. \end{aligned}$$

Уравнение прямой составляем по формуле (5):

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1}, \quad (5)$$

где x_1, y_1 – координаты начальной точки прямой; x_2, y_2 – координаты конечной точки прямой.

Координаты начальной точки т. $O(0, r)$, координаты конечной точки прямой т. N :

$$\begin{aligned}
 y &= d - a_e, \\
 x &= \sqrt{r^2 - (y - r)^2} = \sqrt{r^2 - (d - a_e - r)^2} = \\
 &= \sqrt{r^2 - (r - a_e)^2}.
 \end{aligned}$$

По формуле (5) составляем уравнение прямой, проходящей через т. O и т. N :

$$\begin{aligned}
 \frac{x}{\sqrt{r^2 - (r - a_e)^2}} &= \frac{y - r}{(d - a_e) - r}, \\
 x &= \frac{(y - r) \cdot \sqrt{r^2 - (r - a_e)^2}}{(r - a_e)}.
 \end{aligned}$$

Площадь сегмента, ограниченного окружностью, прямой ON и осью OY :

$$S = \int_{d-a_e}^d \sqrt{r^2 - (y-r)^2} dy + \int_r^{d-a_e} \frac{(y-r) \cdot \sqrt{r^2 - (r-a_e)^2}}{(r-a_e)} dy.$$

После раскрытия интегральных выражений и упрощения получаем:

$$S = \frac{r^2}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{a_e}{r} \right) \right). \quad (6)$$

Подставляем (6) в формулу (3) определяем длину дуги K :

$$K = r \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{a_e}{r} \right) \right). \quad (7)$$

Расстояние NH (рис. 2), образованное углом наклона винтовой режущей кромки и величиной осевой глубины a_p :

$$NH = tg \omega \cdot a_p, \quad (8)$$

где ω – угол наклона винтовой режущей кромки; a_p – осевая глубина резания.

Находим длину дуги по окружности фрезы, на которой режущая кромка одного зуба контактирует с поверхностью резания, подставив формулы (7) и (8) в (2):

$$l_{рез} = \frac{d}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{d} \right) \right) + \frac{1}{2} S_z + tg \omega \cdot a_p. \quad (9)$$

Тогда, время резания одним зубом, контактирующим с поверхностью резания, определяем по формуле (10):

$$\begin{aligned}
 \tau_{рез} &= \frac{60}{\pi \cdot d \cdot n} \times \\
 &\times \left[\frac{d}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{d} \right) \right) + \frac{1}{2} S_z + tg \omega \cdot a_p \right] \quad (10)
 \end{aligned}$$

Зная $\tau_{рез}$, по формуле (11) определяем время холостого хода, т.е. когда ни один зуб не контактирует с заготовкой:

$$\tau_{x.x.} = \frac{l_{x.x.} \cdot 60}{\pi \cdot d \cdot n}. \quad (11)$$

Путь холостого хода $l_{x.x.}$ определяем по формуле (12):

$$l_{x.x.} = l_z - l_{рез}, \quad (12)$$

где l_z – расстояние между двумя зубьями при равномерно расположенных по шагу зубьях (рис. 4). Величину l_z определяем по формуле (13):

$$l_z = \frac{\pi \cdot d}{z}, \quad (13)$$

где z – количество зубьев фрезы.

Период зубцовой частоты определяем по формуле (14):

$$\tau_z = \tau_{рез} + \tau_{x.x.} = \frac{60}{n \cdot z}. \quad (14)$$

Время холостого хода при равно расположенных зубьях по формуле (11):

$$\begin{aligned}
 \tau_{x.x.} &= \frac{60}{n \cdot z} - \frac{60}{\pi \cdot d \cdot n} \times \\
 &\times \left[\frac{d}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{d} \right) \right) + \frac{1}{2} S_z + tg \omega \cdot a_p \right], \quad (15)
 \end{aligned}$$

где длина холостого хода определяем по формуле (12):

$$\begin{aligned}
 l_{x.x.} &= \frac{\pi \cdot d}{z} - \\
 &- \left[\frac{d}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{d} \right) \right) + \frac{1}{2} S_z + tg \omega \cdot a_p \right]. \quad (16)
 \end{aligned}$$

Получив формулы для определения времени резания одним зубом (10) и времени холостого хода (15) проводим анализ влияния всех условий фрезерования на эти параметры при условии абсолютной жесткости фрезы и детали в следующей последовательности.

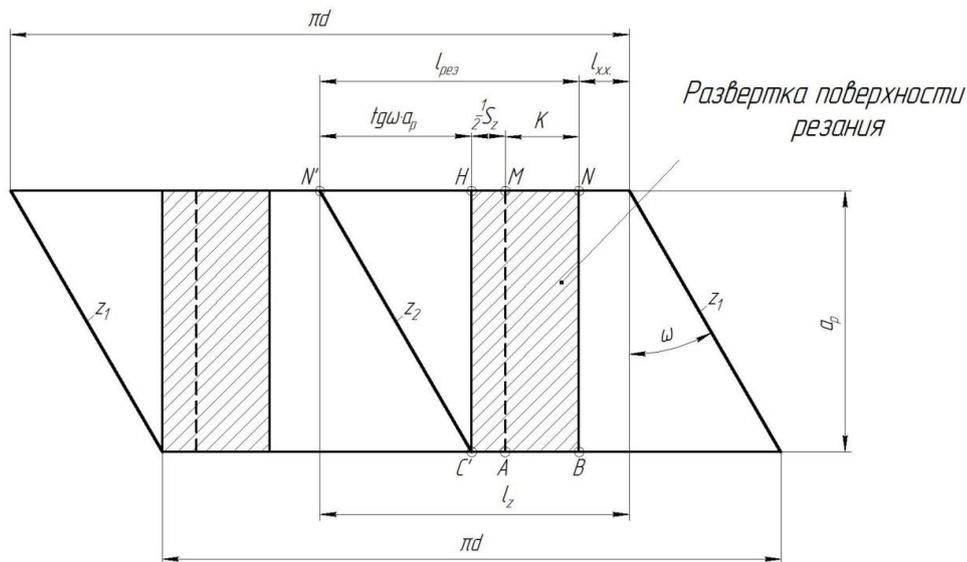


Рис. 4. Схема развертки двузубой фрезы

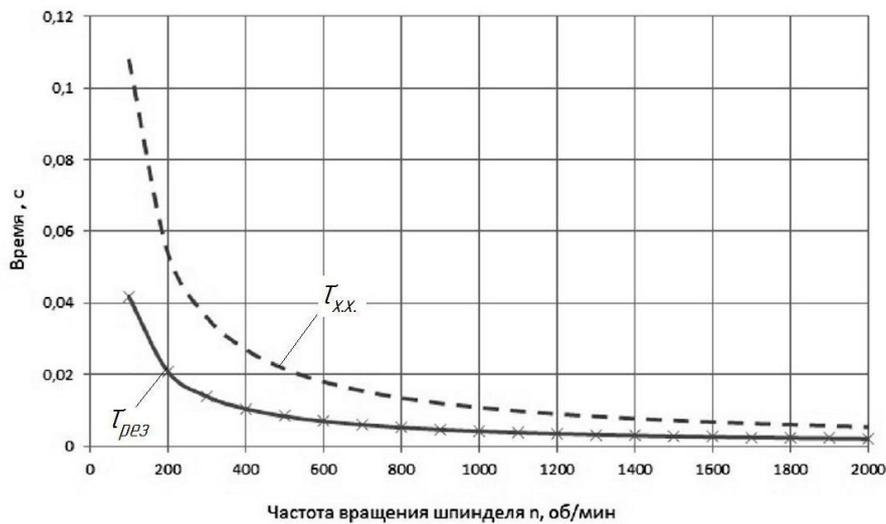


Рис. 5. График зависимости времени резания и времени холостого хода от частоты вращения шпинделя n

1. Определяем влияние частоты вращения шпинделя n на время резания одним зубом $\tau_{рез}$ и время холостого хода $\tau_{х.х.}$ при следующих условиях фрезерования фрезой с углом наклона винтовой режущей кромки $\omega = 30^\circ$: $d_{фр} = 20$ мм, $z = 4$, $a_e = 0,5$ мм, $a_p = 2$ мм, $S_z = 0,1$ мм/зуб (см. рис. 5).

2 Определяем влияние количества зубьев z на время резания одним зубом $\tau_{рез}$ и время холостого хода $\tau_{х.х.}$ при $\omega = 30^\circ$ и следующих условиях фрезерования: $d_{фр} = 20$ мм, $n = 1000$ об/мин, $a_e = 0,5$ мм, $a_p = 2$ мм, $S_z = 0,1$ мм/зуб (см. рис. 6).

3. Определяем влияние диаметра фрезы $d_{фр}$ на время резания одним зубом $\tau_{рез}$ и время холостого хода $\tau_{х.х.}$ при $\omega = 30^\circ$ и следующих условиях фрезерования: $z = 4$, $n = 1000$ об/мин, $a_e = 0,5$ мм, $a_p = 2$ мм, $S_z = 0,1$ мм/зуб (см. рис. 7).

4. Определить влияние угла наклона винтовой режущей кромки ω на время резания одним зубом $\tau_{рез}$ и время холостого хода $\tau_{х.х.}$ при следующих условиях фрезерования: $d_{фр} = 20$ мм, $z = 4$, $n = 1000$ об/мин, $a_e = 0,5$ мм, $a_p = 2$ мм, $S_z = 0,1$ мм/зуб (см. рис. 8).

5. Определяем влияние радиальной глубины a_e на время резания одним зубом $\tau_{рез}$ и время холостого хода $\tau_{х.х.}$ при $\omega = 30^\circ$ и следующих условиях фрезерования: $d_{фр} = 20$ мм, $z = 4$, $n = 1000$ об/мин, $a_p = 2$ мм, $S_z = 0,1$ мм/зуб (см. рис. 9).

6. Определяем влияние осевой глубины a_p на время резания одним зубом $\tau_{рез}$ и время холостого хода $\tau_{х.х.}$ при $\omega = 30^\circ$ и следующих условиях фрезерования: $d_{фр} = 20$ мм, $z = 4$, $n = 1000$ об/мин, $a_e = 0,5$ мм, $S_z = 0,1$ мм/зуб (см. рис. 10).

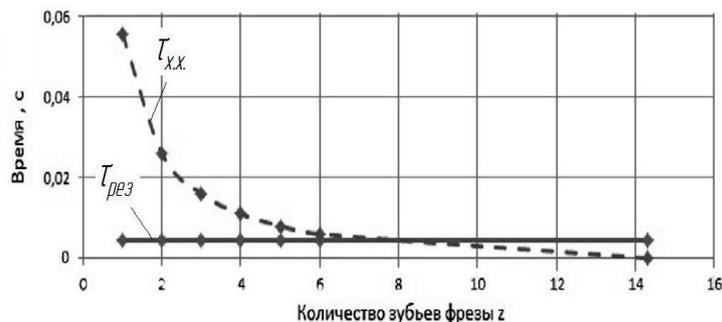


Рис. 6. График зависимости времени резания и времени холостого хода от количества зубьев фрезы, при $n = 1000$ об/мин

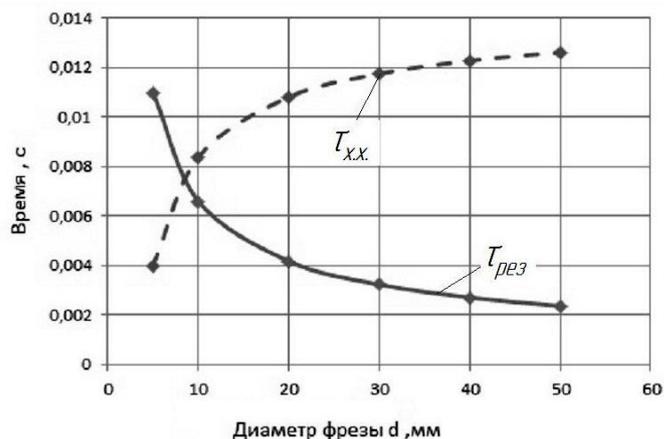


Рис. 7. График зависимости времени резания и времени холостого хода от диаметра фрезы $d_{фр}$

7. Определяем влияние подачи на зуб S_z на время резания одним зубом $\tau_{рез}$ и время холостого хода $\tau_{х.х.}$ при следующих условиях фрезерования: $d_{фр} = 20$ мм, $z = 4$, $n = 1000$ об/мин, $a_e = 0,5$ мм, $a_p = 2$ мм, $\omega = 30^\circ$ (см. рис. 11).

3. ВЫВОДЫ

1. Получены теоретические формулы для определения времени резания одним зубом $\tau_{рез}$ и времени холостого хода $\tau_{х.х.}$, когда при вращении фрезы предыдущий зуб уже вышел из зоны резания, а последующий еще не вошел в контакт со срезаемым слоем.

2. Анализ влияния размеров и геометрии инструмента, а также режимов фрезерования на время резания и время холостого хода позволил установить следующее:

– с увеличением частоты вращения шпинделя n время резания $\tau_{рез}$ и время холостого хода $\tau_{х.х.}$ уменьшаются равномерно, т. е. отношение $\tau_{рез} / \tau_{х.х.}$

остается неизменным;

– с увеличением количества зубьев фрезы z время резания одним зубом остается неизменным, а время холостого хода уменьшается до нуля, после чего в зацеплении с поверхностью резания будет постоянно находиться не менее одного зуба;

– с увеличением диаметра фрезы $d_{фр}$ время резания одним зубом уменьшается, а время холостого хода увеличивается, т. е. отношение $\tau_{рез} / \tau_{х.х.}$ уменьшается;

– с увеличением угла наклона винтовой режущей кромки ω , радиальной a_e и осевой a_p глубин время резания $\tau_{рез}$ увеличивается, а время холостого хода уменьшается, т. е. отношение $\tau_{рез} / \tau_{х.х.}$ увеличивается;

– с увеличением подачи на зуб S_z время резания увеличивается, а время холостого хода уменьшается несущественно;

– в связи с относительно небольшим увеличением времени резания и уменьшением времени холостого хода при увеличении подачи на зуб S_z отношение $\tau_{рез} / \tau_{х.х.}$ остается практически неизменным.

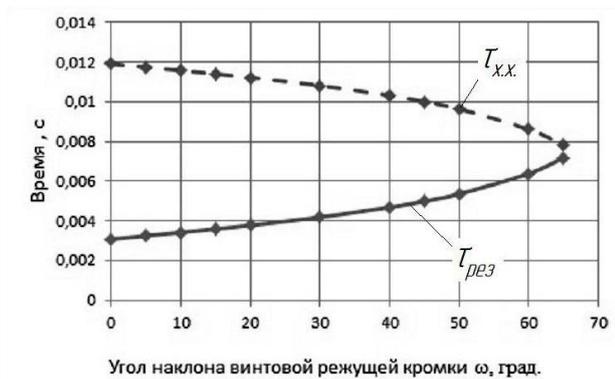


Рис. 8. График зависимости времени резания и времени холостого хода от угла наклона винтовой режущей кромки ω



Рис. 9. График зависимости времени резания и времени холостого хода от радиальной глубины a_e

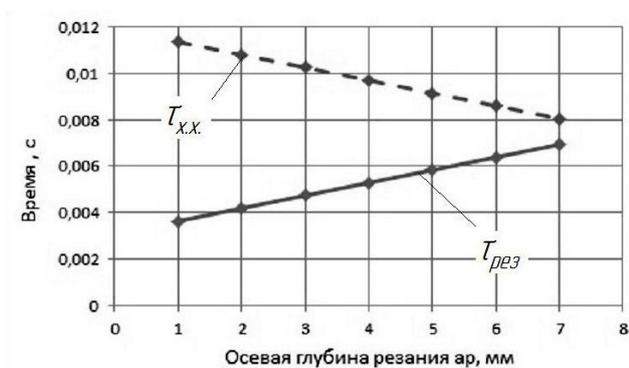


Рис. 10. График зависимости времени резания и времени холостого хода от осевой глубины a_p

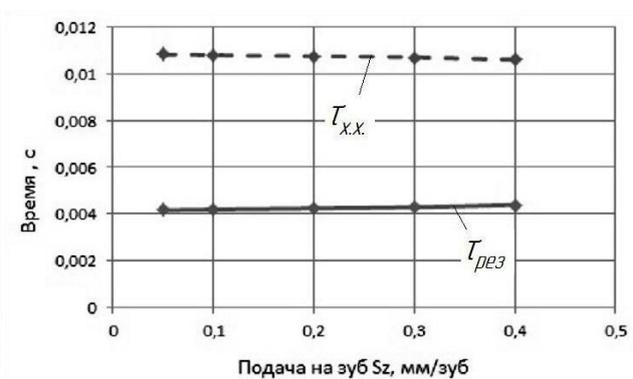


Рис. 11. График зависимости времени резания и времени холостого хода от подачи на зуб S_z

Analysis of conditions for contacting tooth end mills with cylindrical piece

Yu. N. Vnukov¹⁾, S. I. Djadja²⁾, E. B. Kozlova³⁾, N. N. Chernovol⁴⁾

^{1), 2), 3), 4)} Zaporozhye National Technical University, 64, Zhukovskogo Str., 69063, Zaporozhye, Ukraine

The theoretical formulas for determination of cutting time per one tooth and time of idling, when in time of end mill cutter rotation previous tooth already came out from the cutting area, and next one had not yet entered, were received. The ratio of this times in many respects determines the dynamic conditions of milling process. Influence of instrument's size and geometry, and also a milling conditions on cutting time per one tooth and time of idling was analyzed. Results of the analysis allow purposefully to change the conditions of excitation and relaxation of vibrations when milling thin-wall element, if its real rigidity and value of natural vibration period are known.

Key words: thin-wall component, cylindrical end mill cutter, cutting time per one tooth, analysis of cutting time per one tooth.

Аналіз умов контактування зубів кінцевої циліндричної фрези з деталлю

Ю. М. Внуків¹⁾, С. І. Дядя²⁾, Є. Б. Козлова³⁾, Н. М. Черновол⁴⁾

^{1), 2)} Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063

У роботі отримані теоретичні формули для визначення часу різання одним зубом і часу холостого ходу, в момент обертання фрези, коли попередній зуб вийшов із зони різання, а наступний ще не увійшов. Співвідношення цих величин багато в чому визначає динамічні умови процесу фрезерування. Проаналізовано вплив розмірів і геометрії інструменту, а також режимів фрезерування на час різання одним зубом і час холостого ходу. Показано, що при зміні розмірів і геометрії фрези, а також

режимів фрезерування відношення часу різання одним зубом до часу холостого ходу може збільшуватися (зі збільшенням нахилу гвинтової ріжучої кромки, радіальної й осьової глибини), зменшуватися (зі збільшенням діаметра фрези та кількості зубів) або залишатися практично незмінним (зі збільшенням частоти обертання шпинделя й подачі на зуб). Результати аналізу дозволяють цілеспрямовано змінювати умови збудження й релаксації коливань при фрезеруванні тонкостінного елемента, якщо відома його реальна жорсткість та величина періоду власних коливань.

Ключові слова: тонкостінна деталь, кінцева циліндрична фреза, час різання одним зубом, аналіз часу різання одним зубом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Логоминов В. А. Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: дис. канд. техн. наук.: 05.03.01 / Логоминов Виктор Алексеевич. – Запорожье, 2013. – 226 с.
2. Розенберг Ю. А. Резание материалов: Учебник для техн. вузов. – Курган: Изд-во ОАО «Полиграфический комбинат» Зауралье, 2007. – 294 с.
3. Внуков Ю. Н. Стенд для исследования механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей концевыми фрезами / Ю. Н. Внуков, В. А. Логоминов, П. А. Каморкин // Резание и инструмент в технологических системах. – 2011. – Вып. 79. – С. 32–37.
4. Внуков Ю. Н. Разработка методики оценки уровня автоколебаний тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании / [Ю. Н. Внуков, А. И. Гермашев, С. И. Дядя и др.] // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – 2015. – Вип. 10 – С. 3–13.

REFERENCES

1. Logominov V. A. (2013). Formirovanie sheroxovatosti obrabotannoj poverxnosti pri koncevom cilindricheskom frezerovanii tonkostennykh elementov detalej: dis. kand. techn. nauk.: 05.03.01. Zaporozhe. [in Russian].
2. Rozenberg Yu. A. (2007). Rezanie materialov: Uchebnik dlya techn. vuzov. Kurgan. Izd-vo ОАО «Poligraficheskij kombinat» Zaurale. 294 p. [in Russian].
3. Vnukov Yu. N., Logominov V. A., Kamorkin P. A. (2011). Rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemax. Vol. 79. [in Russian].
4. Vnukov Yu. N., Germashev A. I., Dyadya S. I. (2015). Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac. – Vol. 10. [in Russian].