

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ФРЕЗЕРОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКИМИ И ТОРОИДАЛЬНЫМИ ФРЕЗАМИ

Получены теоретические формулы для расчета времени резания одним зубом – $t_{рез}$ при фрезеровании сферическими и тороидальными фрезами. По соотношению величины этого времени с периодом свободных колебаний тонкостенного элемента (ТЭ) детали можно определить динамические условия процесса фрезерования на этапе проектирования технологического процесса. Сравнение экспериментальных и расчетных значений показало, что погрешность не превышает 14 %.

Ключевые слова: тонкостенная деталь, сферическая фреза, тороидальная фреза, время резания одним зубом, время холостого хода.

Введение

Детали, имеющие ТЭ (лопатки моноколеса компрессора газотурбинного двигателя), широко применяются в авиакосмической и других отраслях промышленности. Большинство таких деталей получают путем фрезерной обработки на современных пяти координатных обрабатывающих центрах, используя, как правило, сферические и тороидальные фрезы. Эффективность обработки такими фрезами обеспечивается наклоном оси инструмента относительно обрабатываемой поверхности детали. Основной проблемой при фрезеровании ТЭ деталей является появление вибраций на финишных операциях, которые значительно ухудшают качество обработанной поверхности.

Экспериментальные исследования вибраций, возникающих при конечном финишном фрезеровании ТЭ детали, показали, что на осциллограмме его отклонения от положения равновесия между двумя последовательными врезаниями соседних зубьев инструмента можно выделить все виды возникающих колебаний:

вынужденные, автоколебания и свободные затухающие. Эта часть осциллограммы (рис. 1) названа базовым фрагментом осциллограммы (БФО) [1].

На БФО можно точно определить временные характеристики этих видов колебаний.

а) T_z – период зубцовой частоты возбуждения колебаний, который состоит из $t_{рез}$ – времени резания одним зубом фрезы и t_{xx} – времени холостого хода между резанием двух соседних зубьев.

б) $T_{ЧСКЭ}$ – период собственных частот колебаний элемента, с.

в) $T_{ак}$ – период автоколебаний, с.

Экспериментально установлено, что наибольшая интенсивность автоколебаний проявляется, если соотношение времени резания $t_{рез}$ с периодом собственных колебаний тонкостенного элемента $T_{ЧСКЭ}$, названное определяющим соотношением (ОС), находится в пределах от 7 до 1:

$$7 > ОС = \frac{t_{рез}}{T_{ЧСКЭ}} \geq 1. \quad (1)$$

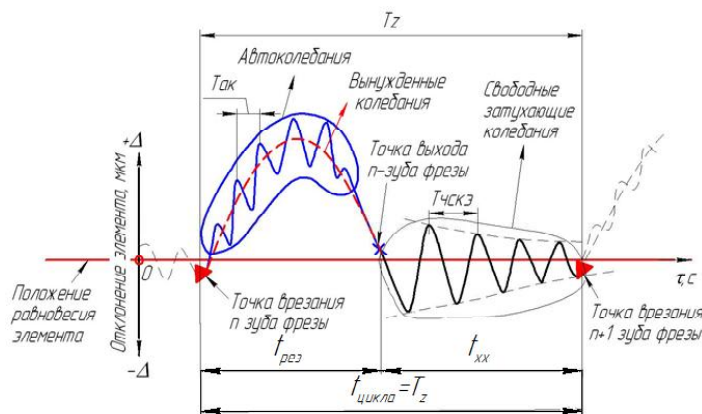


Рис. 1. Базовый фрагмент осциллограммы отклонения тонкостенного элемента при фрезеровании

Таким образом, зная значение $t_{рез}$ и $T_{ЧСКЭ}$ на этапе проектирования технологического процесса, можно определить, какие виды колебаний будут возбуждаться при фрезеровании. Значение $T_{ЧСКЭ}$, являющееся для данного ТЭ детали величиной постоянной, определяют экспериментально, а формулы для расчета времени резания необходимо вывести.

Ранее были получены формулы для определения времени резания одним зубом $t_{рез}$ при концевом цилиндрическом фрезеровании в зависимости от размеров и геометрии инструмента (D – диаметр фрезы, ω – угол наклона режущей кромки, z – число зубьев), режимов фрезерования (a_e – радиальная глубина, a_p – осевая глубина, S_z – подача на зуб и n – частота вращения фрезы), [2].

Определение времени резания для сферических и тороидальных концевых фрез отличается от цилиндрических в связи с другой геометрией и размерами инструментов, а также наличием угла наклона их оси к обрабатываемой поверхности детали.

Целью данной статьи является определение условий контактирования зубьев концевой сферической и тороидальной фрез со срезаемым слоем, определение времени резания одним зубом в зависимости от: диаметра фрезы D (мм); диаметра вершинки зуба D_e (для тороидальной фрезы); количества зубьев z ; припуска a (мм); угла наклона оси инструмента α (°); подачи на зуб S_z (мм/зуб); подачи на строчку $S_{стр}$ (мм) и частоты вращения шпинделя n (об/мин).

Определение времени резания для сферической концевой фрезы

Из схемы финишного фрезерования тонкостенного элемента сферической концевой фрезой (рис. 2) видно, что максимальная длина контакта зуба фрезы и величина срезаемого припуска лежат в плоскости γ , перпендикулярной оси вращения инструмента, проходящей через точки $H - H'$. Поэтому расчет времени резания при данной схеме фрезерования сферической концевой фрезой проводили для соответствующего опорного диаметра $D_{он}$ и радиальной глубины резания, лежащих в плоскости γ .

Время резания одним зубом определяется по формуле:

$$t_{рез} = \frac{l_{рез} \cdot 60}{\pi \cdot D_{он} \cdot n}, \text{ с}, \quad (2)$$

где $l_{рез}$ – длина дуги по окружности фрезы, на которой режущая кромка одного зуба контактирует с поверхностью резания, мм.

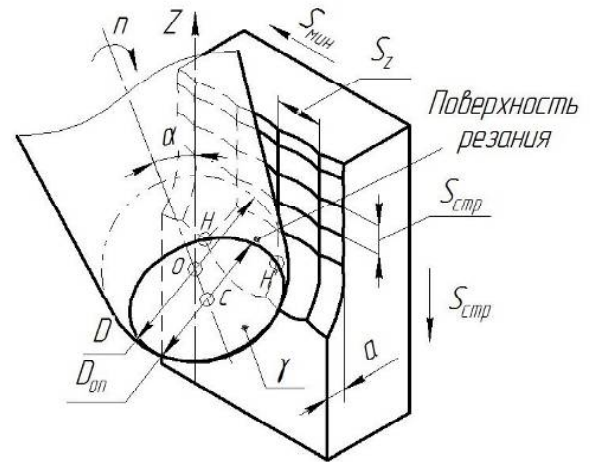


Рис. 2. Схема финишного фрезерования ТЭ детали сферической концевой фрезой:

D – диаметр фрезы; $D_{он}$ – опорный диаметр; α – угол наклона оси фрезы; a – припуск; S_z – подача на зуб; $S_{мин}$ – минутная подача, $S_{стр}$ – подача на строчку

Длину дуги по окружности фрезы, на которой режущая кромка одного зуба контактирует с поверхностью резания, определяют по формуле:

$$l_{рез} = K + a_p \cdot tg\omega + \frac{1}{2} S_z, \text{ мм}, \quad (3)$$

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

Дуга K (рис. 3), находящаяся на опорном диаметре фрезы, рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{D_{он}}{2} \cdot \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D_{он}} \right), \quad (4)$$

где a_e – радиальная глубина резания.

Таким образом, длина дуги по окружности фрезы, лежащая в плоскости γ , на которой режущая кромка одного зуба контактирует с поверхностью резания, рассчитывается по формуле:

$$l_{рез} = \frac{D_{он}}{2} \cdot \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D_{он}} \right) + a_p \cdot tg\omega + \frac{1}{2} S_z, \text{ мм}. \quad (5)$$

Подставим это уравнение в формулу (2) и получим:

$$t_{рез} = \frac{60}{\pi \cdot D_{он} \cdot n} \cdot \left[\frac{D_{он}}{2} \cdot \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D_{он}} \right) + a_p \cdot tg\omega + \frac{1}{2} S_z \right], \text{ с}. \quad (6)$$

Опорный диаметр определяем из рис. 4.

$$D_{он} = 2 \cdot CB. \quad (7)$$

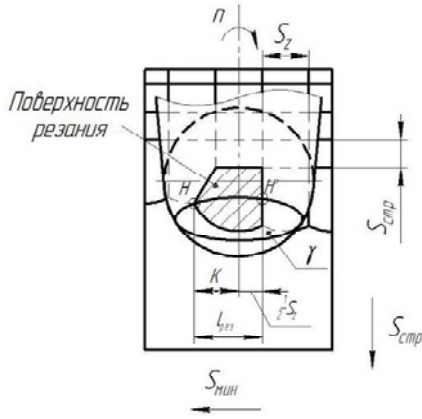


Рис. 3. Схема для определения длины дуги по окружности фрезы, на которой режущая кромка одного зуба контактирует с поверхностью резания

Из прямоугольного треугольника OCB определяем величину CB :

$$CB^2 = OB^2 - OC^2,$$

$$CB = \sqrt{OB^2 - OC^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}D\right)^2 - OC^2},$$

$$OC = OA \cdot \cos \alpha = (OE + EA) \cdot \cos \alpha.$$

Из рис. 4 видно, что $OE = ON - S_{cmp}$. Для определения величины ON напишем уравнения окружности с центром в точке $O(0;0)$:

$$x^2 + z^2 = \left(\frac{1}{2}D\right)^2. \quad (8)$$

Отрезок ON равен координате $z_{N'}$ при $x = x_{N'}$. Координата точки N' по оси X равна $x_{N'} = \frac{1}{2}D - a$. Из уравнения (8) найдем $z_{N'}$:

$$ON = z_{N'} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}D\right)^2 - x_{N'}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}D\right)^2 - \left(\frac{1}{2}D - a\right)^2} = \sqrt{D \cdot a - a^2},$$

$$OE = ON - S_{cmp} = \sqrt{D \cdot a - a^2} - S_{cmp}. \quad (9)$$

Из треугольника AEF находим AE :

$$AE = EF \cdot \operatorname{tg} \alpha = \left(\frac{1}{2}D - a\right) \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

$$\begin{aligned} OC &= (OE + EA) \cdot \cos \alpha = \\ &= \left(\sqrt{D \cdot a - a^2} - S_{cmp} + \left(\frac{1}{2}D - a\right) \cdot \operatorname{tg} \alpha\right) \cdot \cos \alpha = \\ &= \left(\sqrt{D \cdot a - a^2} - S_{cmp}\right) \cos \alpha + \left(\frac{1}{2}D - a\right) \cdot \sin \alpha, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} CB &= \sqrt{OB^2 - OC^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{2}D\right)^2 - \left[\left(\sqrt{D \cdot a - a^2} - S_{cmp}\right) \cos \alpha + \left(\frac{1}{2}D - a\right) \cdot \sin \alpha\right]^2}. \end{aligned}$$

Подставив полученное уравнение в формулу (7), определяют опорный диаметр:

$$D_{on} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{4}D^2 - \left[\left(\sqrt{D \cdot a - a^2} - S_{cmp}\right) \cos \alpha + \left(\frac{1}{2}D - a\right) \cdot \sin \alpha\right]^2}. \quad (10)$$

Как определяли радиальную глубину резания, можно видеть из рис. 5:

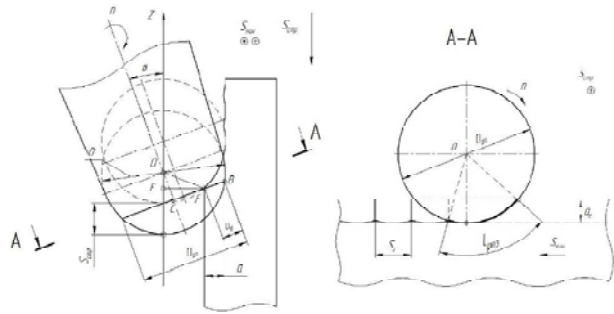


Рис. 5. Схема для определения радиальной глубины резания

$$a_e = \frac{1}{2}D_{on} - CF,$$

$$CF = \sqrt{OF^2 - OC^2},$$

$$\begin{aligned} OF &= \sqrt{OE^2 + EF^2} = \sqrt{\left(\sqrt{D \cdot a - a^2} - S_{cmp}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}D - a\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{2}D - S_{cmp}\right)^2 + S_{cmp}\left(D - 2\sqrt{D \cdot a - a^2}\right)}. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} a_e &= \frac{1}{2}D_{on} - \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{2}D - S_{cmp}\right)^2 + S_{cmp}\left(D - 2\sqrt{D \cdot a - a^2}\right)} - \\ &= \sqrt{\left[\left(\sqrt{D \cdot a - a^2} - S_{cmp}\right) \cos \alpha + \left(\frac{1}{2}D - a\right) \cdot \sin \alpha\right]^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Если угол наклона зуба ω на сферической поверхности фрезы не равен нулю, появляется необходимость в определении осевой глубины резания a_p .

По рис. 6 находим осевую глубину резания:

$$a_p = MN = MO + ON, \quad (13)$$

где $MO = \frac{1}{2}S_{cmp}$.

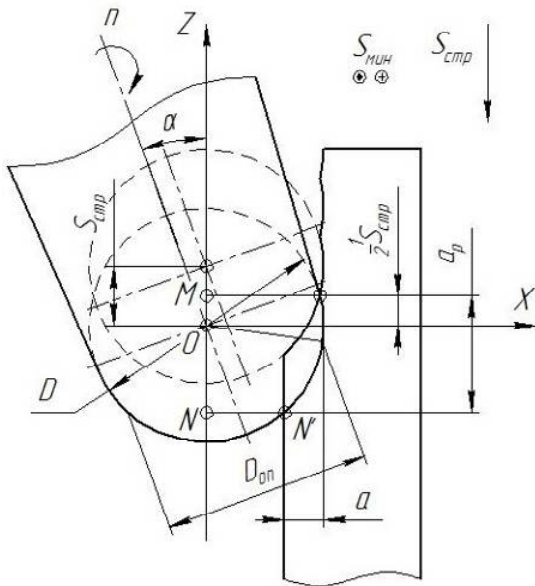


Рис. 6. Схема для определения осевой глубины резания

Подставив уравнение (9) в (13), получим:

$$a_p = \frac{1}{2} S_{cpr} + \sqrt{D \cdot a - a^2}. \quad (14)$$

Для определения времени резания одним зубом подставляем полученные в формулах (10), (12) и (14) значения D_{on} , a_e и a_p в формулу (6).

Определение времени резания для тороидальной концевой фрезы

На рис. 7 представлена схема финишного фрезерования ТЭ детали тороидальной концевой фрезой. Для данной схемы обработки длина дуги по окружности фрезы, на которой режущая кромка одного зуба контактирует с поверхностью резания (рис. 8) и время резания одним зубом определяются так же, как и для сферической концевой фрезы, по формулам (5) и (6) соответственно.

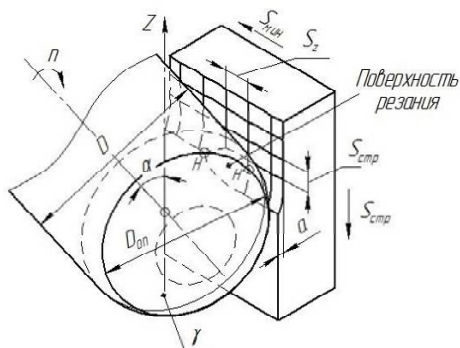


Рис. 7. Схема финишного фрезерования ТЭ детали тороидальной концевой фрезой:

D – диаметр фрезы; D_{on} – опорный диаметр; α – угол наклона оси фрезы; a – припуск; S_{cpr} – подача на строчку; S_z – подача на зуб; $S_{мин}$ – минутная подача

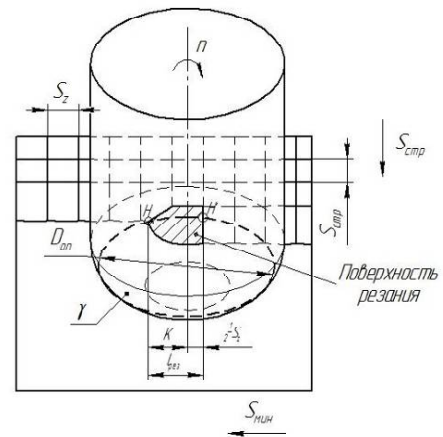


Рис. 8. Схема для определения длины дуги по окружности фрезы, на которой режущая кромка одного зуба контактирует с поверхностью резания

Опорный диаметр определяем из рис. 9:

$$D_{on} = D - D_e + 2 \cdot CB, \quad (15)$$

где D_e – диаметр вершинки зуба фрезы, мм.

CB определяется аналогично сферической фрезе:

$$CB = \sqrt{\frac{1}{4} D_e^2 - \left[\left(\sqrt{D_e \cdot a - a^2} - S_{cpr} \right) \cos \alpha + \left(\frac{1}{2} D_e - a \right) \cdot \sin \alpha \right]^2},$$

$$D_{on} = D - D_e + 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{4} D_e^2 - \left[\left(\sqrt{D_e \cdot a - a^2} - S_{cpr} \right) \cos \alpha + \left(\frac{1}{2} D_e - a \right) \cdot \sin \alpha \right]^2}. \quad (16)$$

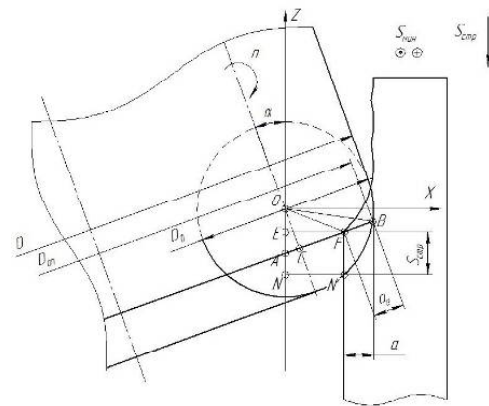


Рис. 9. Схема для определения опорного диаметра тороидальной фрезы

Радиальная глубина резания определяется по формуле:

$$a_e = CB - CF,$$

$$CF = \sqrt{\left(\frac{1}{2} D_e - S_{cpr} \right)^2 + S_{cpr} \left(D_e - 2 \sqrt{D_e \cdot a - a^2} \right) - \left[\left(\sqrt{D_e \cdot a - a^2} - S_{cpr} \right) \cos \alpha + \left(\frac{1}{2} D_e - a \right) \cdot \sin \alpha \right]^2}. \quad (17)$$

$$a_e = \sqrt{\frac{1}{4}D_6^2 - \left[\left(\sqrt{D_6 \cdot a - a^2} - S_{cmp} \right) \cos \alpha + \left(\frac{1}{2}D_6 - a \right) \cdot \sin \alpha \right]^2} - \sqrt{\left(\frac{1}{2}D_6 - S_{cmp} \right)^2 + S_{cmp} \left(D_6 - 2\sqrt{D_6 \cdot a - a^2} \right) - \left[\left(\sqrt{D_6 \cdot a - a^2} - S_{cmp} \right) \cos \alpha + \left(\frac{1}{2}D_6 - a \right) \cdot \sin \alpha \right]^2} \quad (18)$$

Осевая глубина резания учитывается только в том случае, когда угол наклона зуба на радиусной части тороидальной фрезы отличен от нуля. В иных случаях осевая глубина не влияет на величину времени резания одним зубом

$$a_p = \frac{1}{2}S_{cmp} + \sqrt{D_6 \cdot a - a^2} \quad (19)$$

Для определения времени резания одним зубом, подставляем полученные в формулах (16), (18) и (19) значения D_{on} , a_e и a_p в формулу (6).

Сравнение расчетных данных с экспериментальными при определении времени резания $t_{рез}$

Исследования проводили на экспериментальном стенде [3] при следующих условиях:

а) оборудование – универсально фрезерный станок модели FWD-32j;

б) инструмент – концевая сферическая фреза $\varnothing 12$ мм из твердого сплава ВК8, $z = 4$, $\omega = 40^\circ$;

в) образец из Ст 3КП ГОСТ 380-2005 с размерами (длина \times ширина \times высота) $50 \times 20 \times 3$ мм;

г) упругая пластина из Стали 65Г (HRC 60), размерами (длина \times ширина \times высота) $60 \times 6 \times 80$ мм с периодом свободных колебаний $T_{ЧСКЭ} = 0,0023$ с;

д) режимы фрезерования:

- частота вращения шпинделя $n = 355, 560, 900, 1800$ об/мин;

- подача стола $S_{мин} = 71, 112, 180, 355$ мм/мин;

- подача на зуб $S_z = 0,05$ мм/зуб;

- припуск $a = 0,5$ мм;

- подача на строчку $S_{cmp} = 0,5; 1$ мм;

- угол наклона оси фрезы $\alpha = 10^\circ$;

- направление подачи – встречное.

Результаты экспериментов, представленные на рис. 10–13, показывают, что время резания $t_{рез}$ в условиях колебательного процесса ТЭ детали при фрезеровании не является величиной постоянной. Среднее значение этого времени и расчетное приведено в таблице 1.

Знание времени резания необходимо для расчета OC (формула (1)). В таблице 2 приведены значения этого показателя, определенные по экспериментально измеренному и по расчетному времени.

OC , полученные по экспериментальным и расчетным данным, находятся в одном диапазоне, характеризующем виды колебаний при фрезеровании. Так, на рис. 14, a приведен фрагмент осциллограммы, показывающий, что при условиях фрезерования, отмеченных

на рис. 10, действуют вынужденные колебания при резании и свободные затухающие колебания после окончания резания. Эти виды колебаний будут при условии, когда $OC \geq 7$ (в нашем примере $OC_{эксп} = 7,4$ и $OC_{расч} = 8,3$).

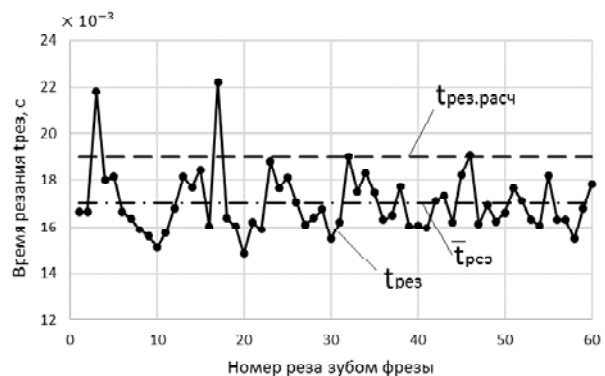


Рис. 10. Время резания одним зубом фрезы, полученное экспериментальным и расчетным путем, при $\alpha = 10^\circ$; $a = 0,5$ мм; $S_{cmp} = 0,5$ мм; $n = 355$ об/мин; $S_{мин} = 71$ мм/мин; ($S_z = 0,05$ мм/зуб)

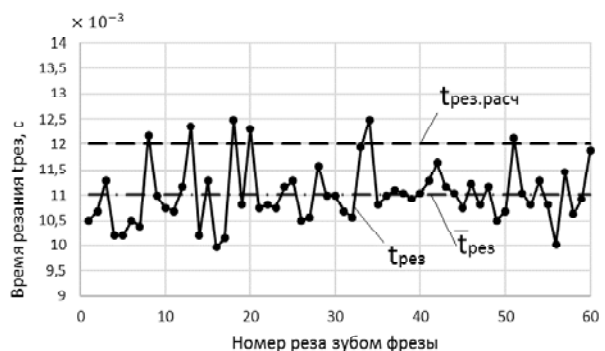


Рис. 11. Время резания одним зубом фрезы, полученное экспериментальным и расчетным путем, при $\alpha = 10^\circ$; $a = 0,5$ мм; $S_{cmp} = 0,5$ мм; $n = 560$ об/мин; $S_{мин} = 112$ мм/мин; ($S_z = 0,05$ мм/зуб)

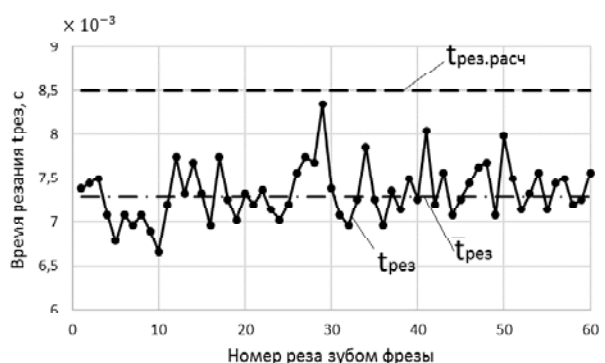


Рис. 12. Время резания одним зубом фрезы, полученное экспериментальным и расчетным путем, при $\alpha = 10^\circ$; $a = 0,5$ мм; $S_{cmp} = 1$ мм; $n = 900$ об/мин; $S_{мин} = 180$ мм/мин; ($S_z = 0,05$ мм/зуб)

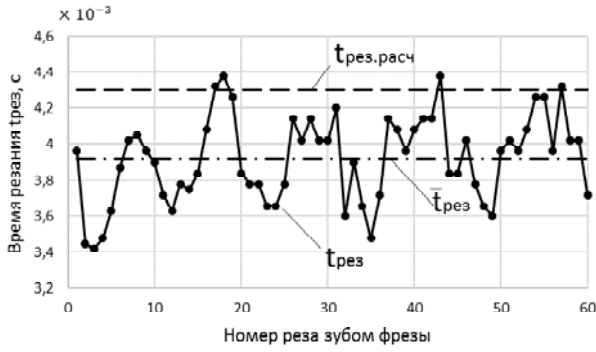


Рис. 13. Время резания одним зубом фрезы, полученное экспериментальным и расчетным путем, при $\alpha = 10^\circ$; $a = 0,5$ мм; $S_{стр} = 1$ мм; $n = 1\ 800$ об/мин; $S_{мин} = 355$ мм/мин; ($S_z = 0,05$ мм/зуб)

Таблица 1 – Время резания $t_{рез}$, полученное при экспериментах и расчетом

Номер рисунка	Время резания, с		Погрешность, %
	эксперимент. среднее, $\bar{t}_{рез}$	расчетное, $t_{рез, расч.}$	
10	0,017	0,019	11
11	0,011	0,012	8
12	0,0073	0,0085	14
13	0,00395	0,0043	8

Таблица 2 – Определяющее соотношение

Номер рисунка	Определяющее соотношение	
	$OC_{эксп}$	$OC_{расч}$
10	7,4	8,3
11	4,7	5,2
12	3,2	3,7
13	1,7	1,9

На рис. 14, б-г показаны фрагменты осциллограмм, соответствующие условиям фрезерования, отмеченных на рис. 11-13, когда действуют вынужденные колебания, автоколебания и свободные затухающие колебания. Эти виды колебаний будут, когда выполняется условие $7 > OC \geq 1$ (в нашем примере все расчетные данные от 5,2 до 1,9 находятся в отмеченном диапазоне). Полученные результаты показывают, что, несмотря на погрешности расчетов (до 14 %), формулы, выведенные для определения времени резания, можно использовать в расчетах определяющего соотношения и определении видов колебаний при фрезеровании сферическими и тороидальными фрезами.

Выводы

Получены теоретические формулы для расчета времени резания одним зубом – $t_{рез}$ при фрезеровании сферическими и тороидальными концевыми фрезами в зависимости от геометрии и размеров инструмента (диаметра фрезы D ; диаметра вершинки зуба D_g (для

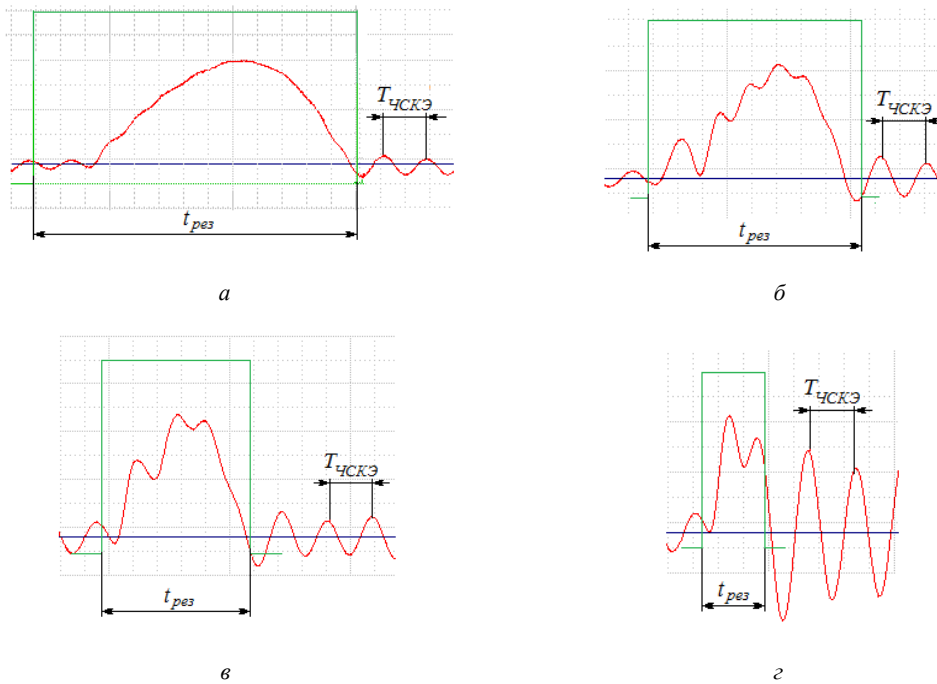


Рис. 14. Фрагменты осциллограмм колебательного движения ТЭ детали:

а – $OC = 8,3$; б – $OC = 5,2$; в – $OC = 3,7$; г – $OC = 1,9$

тороидальной фрезы); количества зубьев z и режимов резания (осевой a_p и радиальной a_e глубины фрезерования; угла наклона оси инструмента α ; подачи на зуб S_z ; подачи на строчку $S_{стр}$ и частоты вращения шпинделя n). Знание этого времени и периода собственных колебаний ТЭ детали позволяет рассчитать ОС и определить динамические условия процесса фрезерования на этапе проектирования технологического процесса.

Список литературы

1. Внуков Ю. Н. Разработка методики оценки уровня автоколебаний тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании / [Внуков Ю. Н., Гермашев А. И., Дядя С. И. и др.] //

Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Вип. 10 / редкол. : В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – 343 с. – Укр., рос., англ. мовами. – С. 36–14.

2. Анализ условий контактирования зубьев концевой цилиндрической фрезы с деталью / [Внуков Ю. Н., Дядя С. И., Козлова Е. Б., Черновол Н. Н.] // Журнал инженерных наук : науч. журн. – Том 1, № 4. – Суми : СумДУ, 2015.
3. Внуков Ю. Н. Стенд для изучения механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей при концевом фрезеровании / Ю. Н. Внуков, В. А. Логоминов, П. А. Каморкин // Резание и инструмент в технологических системах : Межд. научн. техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 32–37.

Одержано 07.12.2015

Внуков Ю.М., Дядя С.І., Кришталь В.О., Черновол Н.М. Визначення умов фрезерування сферичними та тороїдальними фрезами

Отримані теоретичні формули для розрахунку часу різання одним зубом – $t_{рез}$ при фрезеруванні сферичними та тороїдальними фрезами. За допомогою співвідношення цього часу до періоду власних коливань тонкостінного елемента деталі можливо визначити динамічні умови процесу фрезерування на етапі проектування технологічного процесу. Порівняння експериментальних та розрахункових значень показало, що похибка не перевищує 14 %.

Ключові слова: тонкостінна деталь, сферична фреза, тороїдальна фреза, час різання одним зубом, час неробочого ходу.

Vnukov Yu., Djadja S., Krishtal V., Chernovol N. Determination of milling conditions for ball nose and bull nose end mills

The theoretical formulas for determination of cutting time per one tooth – $t_{рез}$ during the ball nose and bull nose end milling were received. By the ratio of this time and natural vibration period of detail's thin-wall element, the dynamic conditions of milling process can be pre-determined at the stage of designing the technological process. The comparison of experimental and theoretical values shows that measurement error doesn't exceed 14 %.

Key words: thin-wall component, ball nose mill, bull nose mill, cutting time per one tooth, time of idling.