

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТОНКОСТЕННОГО ЭЛЕМЕНТА ДЕТАЛИ

Приведены результаты экспериментального исследования концевой фрезеровки тонкостенных элементов деталей. Рассмотрен механизм формирования автоколебаний при попутном концевом цилиндрическом фрезеровании и его влияние на процесс резания.

**Ключевые слова:** тонкостенный элемент детали, регенеративные автоколебания, время резания, длина контакта, период автоколебаний.

Автоколебания, возникающие в определенном диапазоне скоростей при концевом фрезеровании [1], негативно сказываются на производительности обработки, стойкости инструмента и качестве обработанной поверхности. Поэтому для того, чтобы знать, каким образом снижать интенсивность автоколебаний, надо более детально исследовать механизм их возбуждения.

Для этого использовали экспериментальный стенд [2], на котором возможно создавать условия концевой фрезеровки тонкостенных элементов деталей (ТЭД), например, лопаток моноколес компрессоров авиационных двигателей, при которых возбуждаются регенеративные автоколебания.

Экспериментальные исследования проводили на вертикально-фрезерном станке мод. FWD-32J цилиндрической концевой фрезой  $\varnothing 55$  мм с одним зубом  $z = 1$  (ВК8) и углом наклона режущей кромки  $\omega = 0^\circ$  [3] в скоростной зоне, в которой возникают автоколебания при следующих условиях:

1. Материал обрабатываемого образца – Ст 3 кп.
2. Режимы фрезерования:  
частота вращения шпинделя,  $n_{\text{шп}} = 280$  об/мин;  
подача на зуб,  $S_z = 0,1$  мм/зуб;  
радиальная глубина резания,  $a_e = 0,5$  мм;

осевая глубина резания,  $a_p = 4$  мм.

3. Частота собственных колебаний исследуемой упругой системы тонкостенного элемента,  $f_{\text{дет}} = 390$  Гц.

4. Частота собственных колебаний концевой фрезы  $f_{\text{фр}} = 813$  Гц.

5. Направление фрезерования – попутное, резание свободное.

Для исследования механизма возбуждения автоколебаний использовали осциллограммы, записанные при фрезеровании. Они, с одной стороны, описывают закон движения детали при резании, с другой стороны, характеризуют вид поверхности резания. Поэтому по ним можно наблюдать, как меняется поверхность резания, как зарождаются автоколебания и как действует дальнейший механизм их поддержания.

Одним из параметров, по которому можно оценивать возникновение автоколебаний, является время резания. Для его измерения использовали электроконтактное устройство [4], в котором замыкание электрической цепи осуществлялось при врезании зуба фрезы в деталь и размыкание при его выходе. Сигнал записывался одновременно с процессом резания. На рис. 1 показан фрагмент осциллограммы с отметкой контакта зуба фрезы и детали.

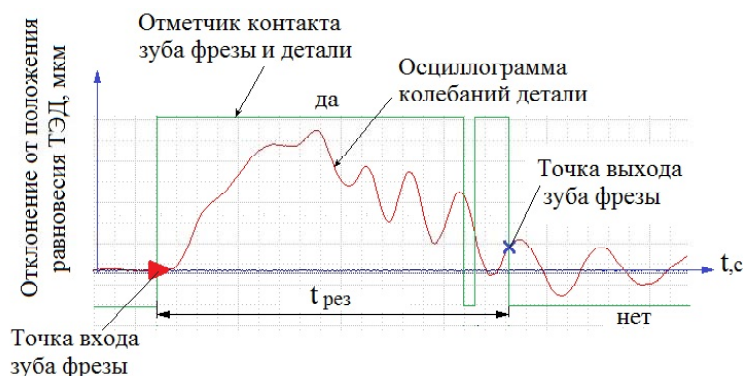


Рис. 1. Отметчик контакта зуба фрезы и детали при исследовании процесса концевой цилиндрической фрезеровки во временном диапазоне

Линия «да» на рисунке характеризует наличие контакта между зубом фрезы и деталью. Линия «нет» отмечает, что контакт отсутствует. Время резания  $t_{рез}$  определяется по осциллограмме между точками входа зуба фрезы и его выходом.

Осциллограммы, записанные при попутном фрезеровании, показывают, что автоколебания появляются не сразу. Для их возбуждения и дальнейшего продолжения необходимо, чтобы были определены вынуждающая сила, время на преодоления демпфирования срезаемого слоя и время для периодов автоколебаний.

При исследовании механизма возбуждения автоколебаний следует рассматривать две зоны (рис. 2). Первую (I) – от начала входа зуба фрезы и до его выхода на полную глубину резания  $a_e$ . Вторую (II) – при резании на полную радиальную глубину  $a_e$ . При фрезеровании в первой зоне длина поверхности резания  $l_{рез}$  должна меняться на каждом резе по мере увеличения радиальной глубины, достигая наибольшего значения  $l_{рез}^{max}$  при входе во вторую зону.

Первая зона не участвует в образовании обработанной поверхности, но она определяет, какой будет поверхность резания при переходе во вторую зону, где и формируется обработанная поверхность.

Величина врезания фрезы ( $l_{вр}$ ) до выхода на полную глубину резания  $a_e$  определяется по формуле [5]:

$$l_{вр} = S_z N = \sqrt{a_e(D_{фр} - a_e)},$$

где  $S_z$  – подача фрезы, мм/зуб;

$N$  – количество резов фрезы до выхода на полную глубину резания;

$a_e$  – радиальная глубина резания, мм;

$D_{фр}$  – диаметр фрезы, мм.

Количество резов зубом фрезы ( $N$ ) для выхода на полную глубину резания определяется по формуле:

$$N = \frac{l_{вр}}{S_z} = \frac{\sqrt{a_e(D_{фр} - a_e)}}{S_z}.$$

Согласно исходным данным, в первой зоне для выхода на полную глубину резания необходимо сделать 53 реза зубом фрезы.

В начале фрезерования, когда время резания  $t_{рез}$  меньше, чем период автоколебаний  $T_{ак}$  на поверхности резания не могут возникнуть несколько волн. Поэтому на осциллограммах (рис. 3) в начальный момент резания видны только вынужденные и собственные колебания ( $T_{скд}$ ) детали после выхода зуба фрезы. Такой характер осциллограмм наблюдается до 18 реза.

В табл. 1 записаны значения времени резания от начала фрезерования и до появления автоколебаний.

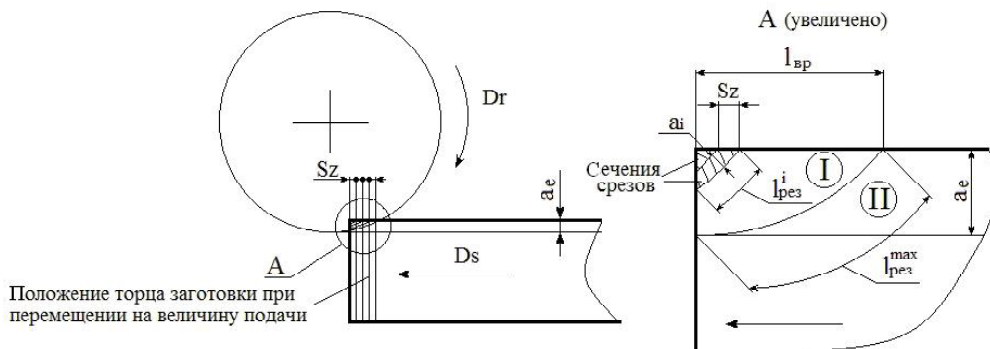


Рис. 2. Изменение длины контакта  $l_{рез}$  при врезании фрезы в заготовку

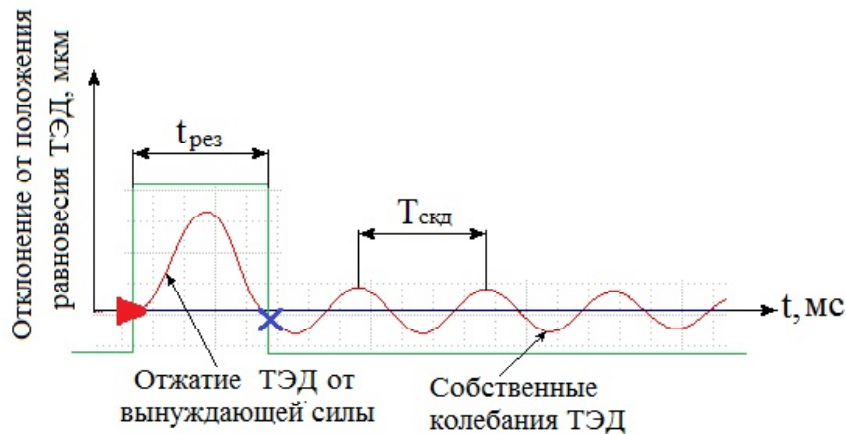


Рис. 3. Колебания ТЭД в начальный период резания

**Таблица 1** – Время резания до появления автоколебаний в первой

Номер реза	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Время резания, мс	0,12	0,72	0,78	0,81	0,75	0,90	1,08	1,29	2,28
Номер реза	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Время резания, мс	2,70	3,06	2,97	2,73	2,97	4,11	3,9	3,3	4,47
Номер реза	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Время резания, мс	4,56	4,62	4,71	4,77	5,01	5,28	5,58	5,91	6,15

С 18 реза (время резания 4,47 мс) начинают проявляться признаки автоколебаний. Вначале, через 0,78 мс после начала резания, возникает небольшое колебание с амплитудой 4,4 мкм, а на последующих резах уже проявляются периоды автоколебаний (рис. 4).

При изучении возбуждения автоколебаний в первой зоне измеряли время резания, время начала автоколебаний, их период и количество волн. В табл. 2 приведены значения этих параметров для осциллограмм с 28 по 53 рез.

На рис. 5 показан график изменения времени резания в первой зоне.

График показывает, что по мере врезания фрезы в заготовку увеличивается длина поверхности резания и время резания, но длина поверхности резания изменяется неравномерно, периодически увеличиваясь и уменьшаясь. Это связано с особенностью попутного фрезерования, когда направление движения подачи и вращения инструмента совпадают. Волны от автоколебаний, образующиеся на поверхности резания, постоянно смещаются в сторону выхода инструмента из зоны резания. На это указывают значения времени начала автоколебаний в табл. 2 и построенный график на рис. 6. Волна от автоколебаний, перемещаясь на каждом резе, «сбегает» с поверхности резания. При этом уменьшается ее длина и время резания (падающие участки на рис. 5). Но движение волн автоколебаний не меняет общую тенденцию к увеличению длины поверхности резания и времени резания на каждом резе в первой

зоне. Также изменяется и количество волн автоколебаний. При этом наблюдается тесная корреляционная зависимость между временем резания и временем начала автоколебаний (коэффициент корреляции 0,89).

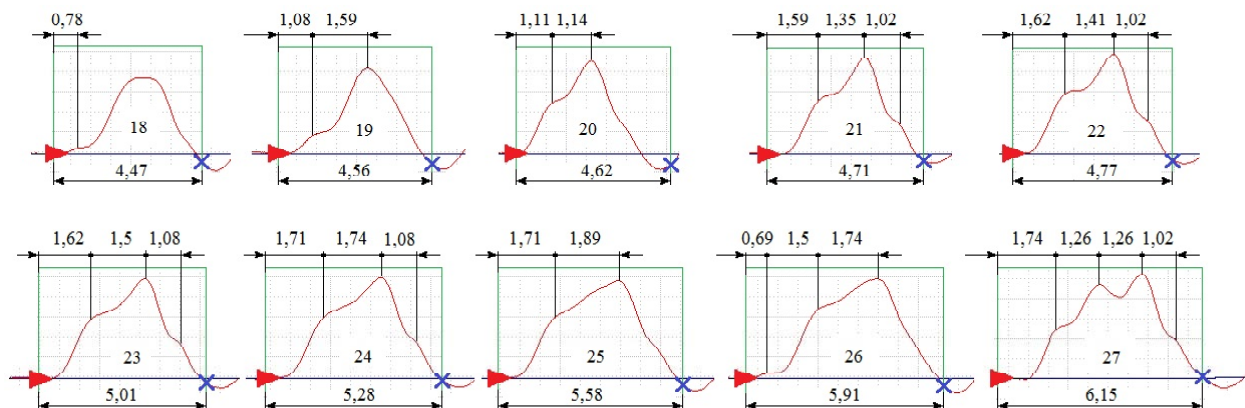
Периоды волн автоколебаний в первой зоне, как видно из табл. 2, не имеют постоянного одного значения (рис. 7) и не равны периодам свободных колебаний детали и инструмента.

Исследование корреляционной связи между временем резания и суммой периодов автоколебаний на резах показало, что между ними наблюдается небольшая зависимость (коэффициент корреляции 0,58).

Накладывание осциллограмм соседних резов показывает сдвиг по фазе между волнами в сторону движения подачи, который может иметь значения от  $\frac{\pi}{2}$  до  $\frac{\pi}{4}$  (рис. 8).

Из вышесказанного следует отметить, что при выходе на полную глубину резания, поверхность резания волнистая и фрезерование во второй зоне будет происходить в условиях действия регенеративных автоколебаний.

Теоретически длина поверхности резания во второй зоне на каждом резе должна быть одинакова, одинаковым должно быть и время резания. Но реальная картина имеет иной вид. Характерная особенность времени фрезерования во второй зоне показана на рис. 9. График построен по результатам анализа 100 осциллограмм и имеет пилообразную форму.



**Рис. 4.** Зарождение автоколебаний в первой зоне

Таблица 2 – Измеряемые параметры осциллограмм первой зоны

Номер реза	Время резания, мс	Время до начала автоколебаний, мс	Количество волн автоколебаний	Период автоколебаний/частота, мс/Гц			
				$T_1/f_1$	$T_2/f_2$	$T_3/f_3$	$T_4/f_4$
28	6,06	1,80	4	1,26/793	1,26/793	1,02/980	-
29	6,21	1,80	4	1,41/709	1,26/793	1,17/855	-
30	6,51	1,32	4	1,41/709	1,26/793	1,35/741	-
31	5,61	0,99	4	1,26/793	0,96/1042	1,11/900	-
32	5,49	1,32	4	1,26/793	1,11/900	1,11/900	-
33	7,02	1,71	3	1,59/628	1,35/741	-	-
34	5,94	1,32	3	1,50/667	1,35/741	-	-
35	6,27	1,62	4	1,50/667	1,35/741	0,96/1042	-
36	6,54	1,77	4	1,50/667	1,41/709	0,96/1042	-
37	6,48	1,68	4	1,59/628	1,50/667	0,96/1042	-
38	6,72	2,07	4	1,50/667	1,50/667	0,96/1042	-
39	6,90	2,16	4	1,50/667	1,50/667	0,96/1042	-
40	7,23	2,49	4	1,50/667	1,50/667	0,96/1042	-
41	6,72	2,64	4	1,50/667	1,50/667	0,96/1042	-
42	7,71	2,88	4	1,50/667	1,50/667	1,17/855	-
43	7,44	3,15	3	1,50/667	1,50/667	-	-
44	7,74	3,48	3	1,50/667	1,50/667	-	-
45	8,13	3,78	3	1,50/667	1,50/667	-	-
46	7,71	1,47	5	1,35/741	0,96/1042	1,35/741	1,17/855
47	8,01	1,80	5	1,35/741	1,11/901	1,35/741	1,17/855
48	8,22	2,01	5	1,35/741	1,17/855	1,35/741	1,17/855
49	8,37	2,07	5	1,47/680	1,35/741	1,35/741	1,08/926
50	8,31	2,10	5	1,56/641	1,35/741	1,35/741	1,11/901
51	7,68	2,10	4	1,56/641	1,35/741	1,50/667	-
52	7,65	1,41	5	1,05/952	1,26/793	1,50/667	1,35/741
53	7,89	1,56	5	1,14/877	1,26/793	1,56/641	1,35/741

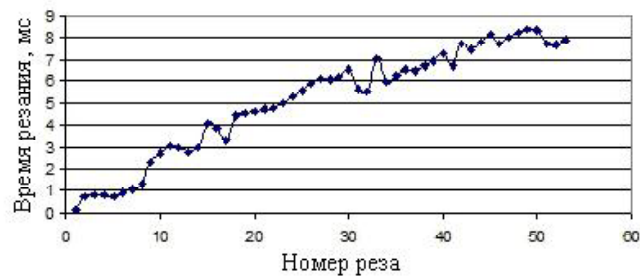


Рис. 5. Изменение времени резания в первой зоне

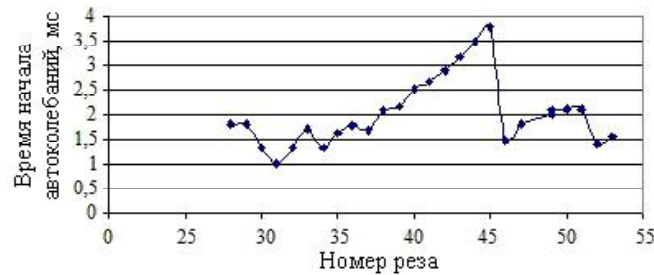


Рис. 6. Изменение времени начала автоколебаний в первой зоне

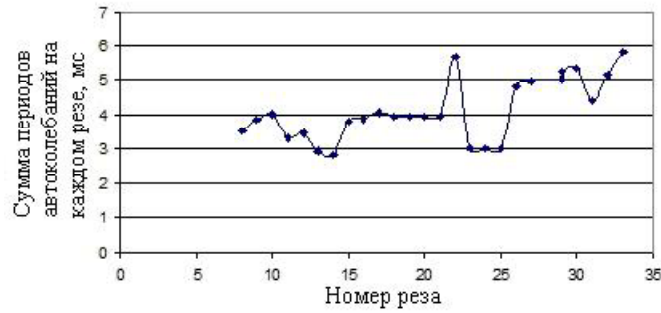


Рис. 7. Сумма периодов автоколебаний на резах в первой зоне

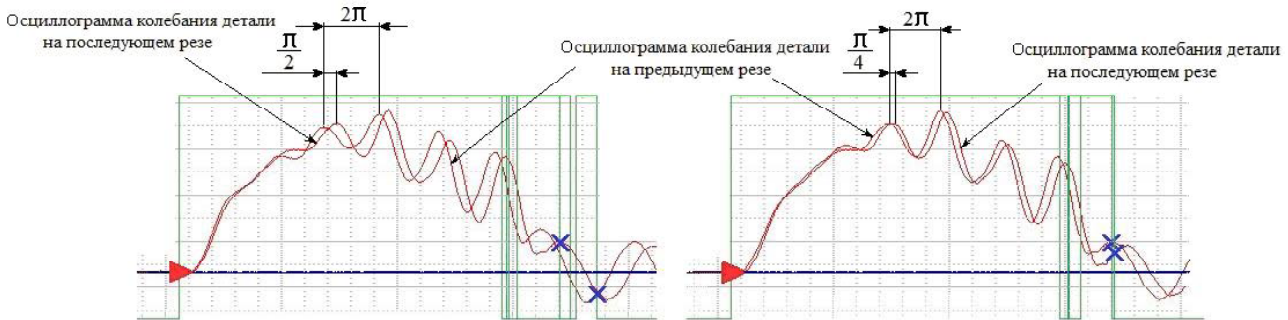


Рис. 8. Сдвиг по фазе между волнами соседних резов в первой зоне

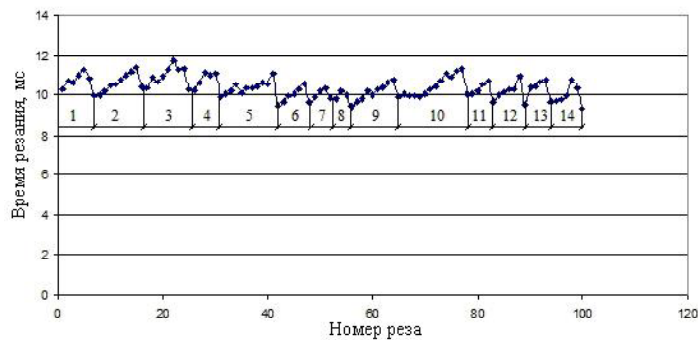


Рис. 9. Изменение времени резания при фрезеровании во второй зоне

Это свидетельствует о том, что время резания периодически увеличивается, затем уменьшается. Аналогично меняется и длина поверхности резания. По результатам исследования периодичности ее изменения построена табл. 3. Так как шаг изменения длины поверхности резания неодинаковый и неравномерный, поэтому в табл. 3 записаны его средние значения.

Количество резов на интервалах от минимальной до максимальной длины поверхности резания не постоянное, не имеет закономерности и носит случайный характер (рис. 10).

Случайным образом меняется и шаг изменения длины поверхности резания на отмеченных интервалах (рис. 11).

На рис. 12 показан график изменения времени начала автоколебаний на резах во второй зоне.

Корреляционная зависимости между временем резания и временем начала автоколебаний колеблется от

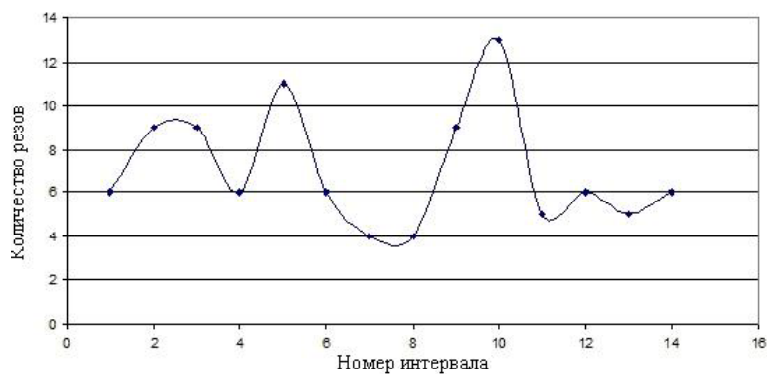
0,24 (слабая связь) до 0,94 (сильная связь). Такой характер корреляции связан с тем, что зарождение новой волны автоколебаний происходит произвольно, а не когда время резания минимально. Слабая корреляционная зависимость проявляется, когда образуется новая волна и время начала автоколебаний уменьшается, но при этом время резания не снижается, т. е. меньшее время начала автоколебаний не совпадает с меньшим временем резания. Сильная корреляционная связь проявляется, когда увеличивается и время начала автоколебаний и время резания.

За счет движения волн автоколебаний на каждом резе постоянно происходит их сдвиг по фазе между предыдущим проходом и текущим, который может

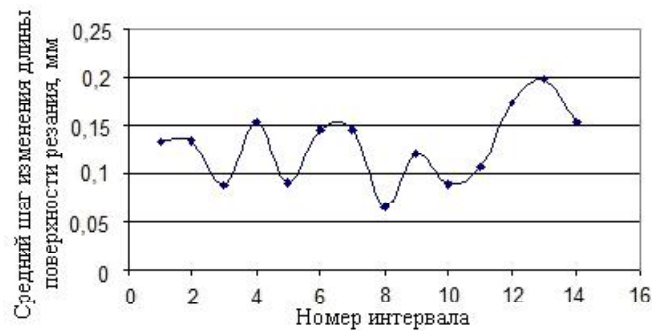
иметь значения от  $\frac{\pi}{6}$  до  $\pi$  (рис. 13).

**Таблиця 3** – Количество резов и шаг изменения длины поверхности резания

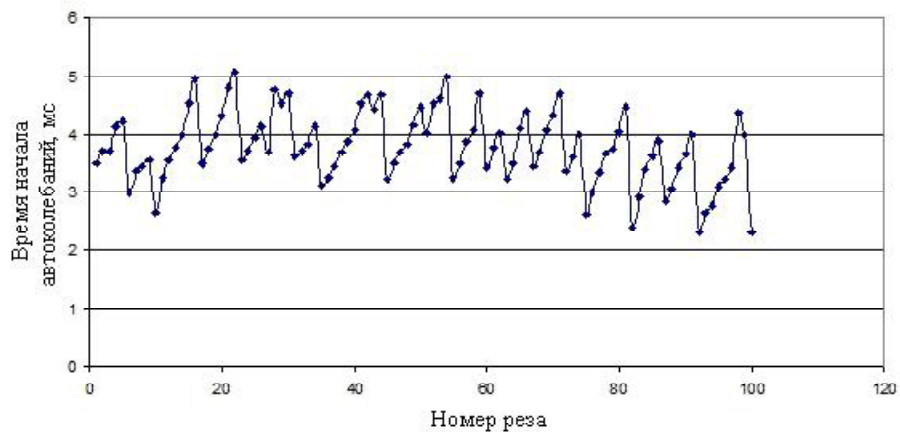
Интервал	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Шаг интервала, мм	0,798	1,209	0,797	0,919	0,991	0,87	0,58	0,266	1,088	1,16	0,532	1,039	0,991	0,918
Средний шаг изменения длины поверхности резания, мм	0,133	0,134	0,088	0,153	0,09	0,145	0,145	0,065	0,120	0,089	0,106	0,173	0,198	0,153
Количество резов, шт	6	9	9	6	11	6	4	4	9	13	5	6	5	6



**Рис. 10.** Количество резов на интервалах от минимальной до максимальной длины поверхности резания



**Рис. 11.** Средний шаг изменения длины поверхности резания при попутном фрезеровании во второй зоне



**Рис. 12.** Изменение времени начала автоколебаний во второй зоне

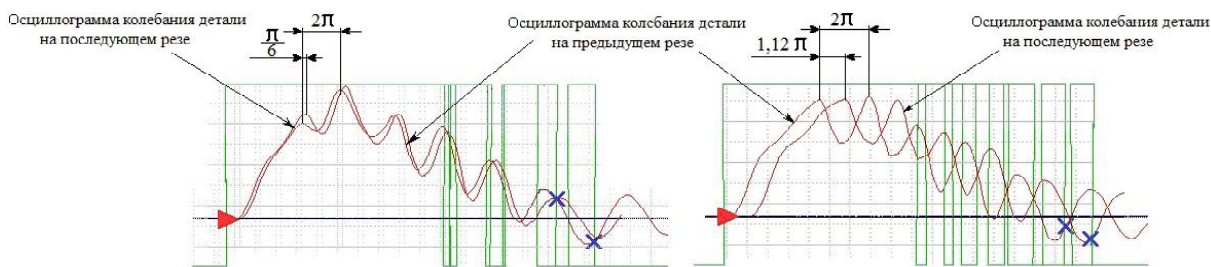


Рис. 13. Сдвиг по фазе между волнами автоколебаний предыдущего и текущего реза

На рис. 14 показан график изменения суммы периодов автоколебаний на резах.

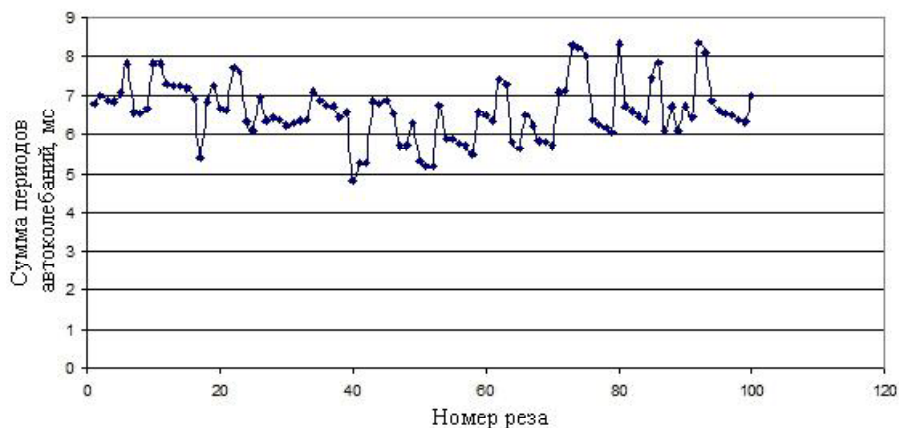


Рис. 14. Сумма периодов автоколебаний на резах во второй зоне

Коэффициент корреляции между временем резания и суммой периодов автоколебаний на резах меняется от 0,13 (слабая зависимость) до 0,77 (сильная зависимость). На основании графиков на рисунках 12 и 14 можно сделать вывод, что на изменение времени резания влияют как время начала автоколебаний, так и сумма периодов автоколебаний на резах. Кроме этого из рис. 14 видно, что периоды автоколебаний на резах во второй зоне неодинаковые и постоянно меняются. На рисунке 15 приведен один из фрагментов осциллограммы колебаний детали во второй зоне с указанием периодов автоколебаний. Их значения и соответствующие им частоты для одного из участков резания от максимального до минимального времени резания, приведены в таблице 4.

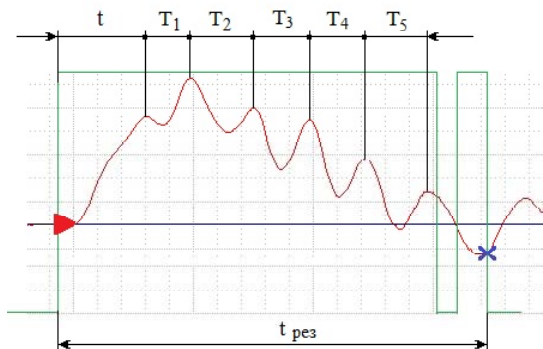


Рис. 15. Периоды автоколебаний

Движение волн и изменение периодов автоколебаний влияет на время резания. Благодаря использованию отметчика контакта инструмента и детали, была выявлена следующая закономерность изменения времени резания. Его наибольшее значение  $t_{max}$  будет, когда точка выхода инструмента из контакта с деталью находится на участке осциллограммы, пересекшего линию упругого равновесия (рис. 16 а). На последующем резе, когда волны автоколебаний сместятся, и точка выхода уже не пересекает линию упругого равновесия, время контакта будет наименьшим  $t_{min}$  (рис. 16 б).

Изменение времени резания сопровождается и изменением глубины формообразующей лунки, оставляемой на обработанной поверхности инструментом на последней волне автоколебаний. Особенность изменения глубины лунки показана на рисунке 17.

Построенный график имеет такую же пилообразную форму, как и график изменения времени резания (рис. 9). Коэффициент корреляции между ними показывает на тесную связь, но имеет отрицательное значение «- 0,94». Это говорит о том, что при наименьшем времени резания глубина лунки будет наибольшей, а при наибольшем времени – наименьшей. Такой характер изменения глубины лунки приводит к тому, что обработанная поверхность имеет волнистый профиль с шагом  $S_w$  и высотой  $W_z$  (рис. 18).

Таблиця 4 – Періоди автоколебаний/частота для одного из участков второй зоны

№	Период/частота, мс/Гц						
	$t$	$T_1/f$	$T_2/f$	$T_3/f$	$T_4/f$	$T_5$	$t_{рез}$
1	2,22	1,14/877	1,56/641	1,44/694	1,35/741	1,56/641	10,74
2	2,28	1,2/833	1,56/641	1,44/694	1,44/694	1,77/565	10,80
3	2,52	1,26/793	1,56/641	1,44/694	1,44/694	-	9,72
4	2,61	1,44/694	1,35/741	1,44/694	1,44/694	-	9,75
5	2,82	1,44/694	1,35/741	1,44/694	1,50/667	-	9,93
6	3,51	1,50/667	1,35/741	1,35/741	1,56/641	-	10,74
7	2,88	1,89/529	1,35/741	1,35/741	1,74/574	-	10,29
8	2,07	1,02/980	0,72/1389	1,35/741	1,35/741	1,50/667	9,30

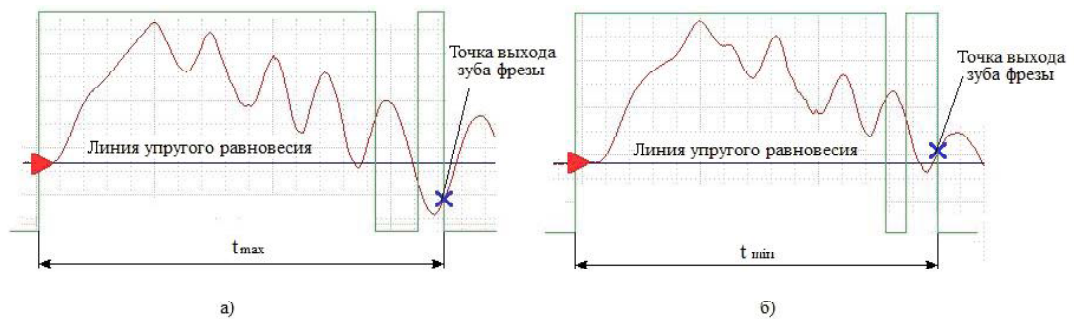


Рис. 16. Две соседние осциллограммы с наибольшим и наименьшим временем резания

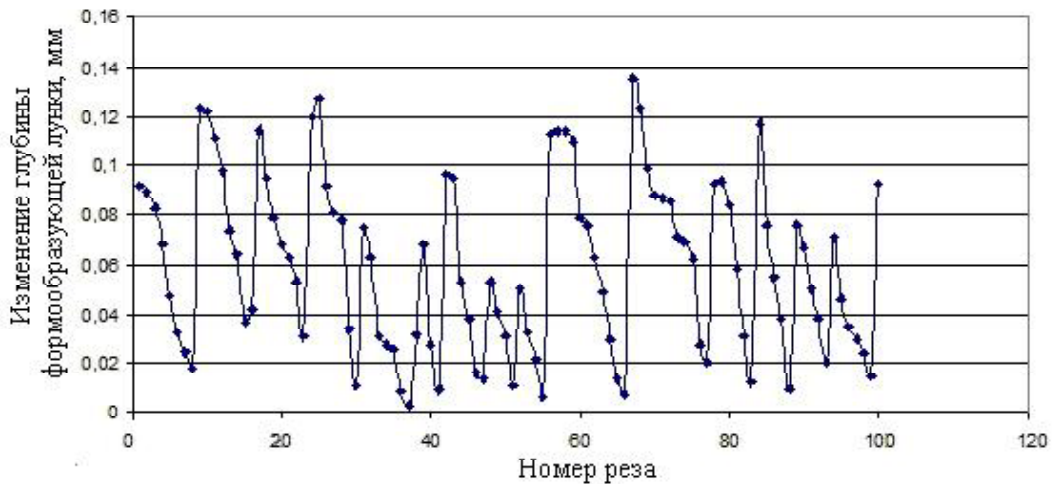


Рис. 17. Изменение глубины формообразующей лунки на обработанной поверхности

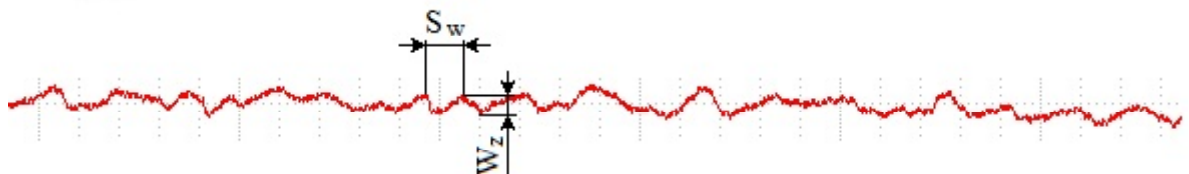


Рис. 18. Профилограмма обработанной поверхности после попутного фрезерования



## Выводы

1. Автоколебания при попутном фрезеровании проявляются не сразу. Для этого необходимо время, чтобы преодолеть демпфирование срезаемого слоя и проявились периоды автоколебаний. Анализ образования автоколебаний удобно проводить, разделив процесс резания на две зоны. Первая зона охватывает участок от врезания фрезы до выхода на полную глубину резания. После этого начинается вторая зона.

2. Формирование автоколебаний начинается уже в первой зоне еще до выхода на полную глубину резания, поэтому фрезерование во второй зоне происходит по следу, т.е. в условиях регенерации.

3. Особенностью попутного фрезерования является совпадение направления движения подачи и вращения инструмента, что приводит к постоянному сдвигу по фазе волн автоколебаний последующего реза относительно предыдущего в сторону направления подачи и изменению толщины срезаемого слоя.

4. Время резания при попутном фрезеровании периодически меняется от наименьшего до наибольшего. Это связано с изменением времени начала автоколебаний и суммы периодов автоколебаний.

5. Периоды автоколебаний в пределах реза имеют разные значения, зависящие от толщины срезаемого слоя.

6. При периодическом изменении времени резания происходит движение волн автоколебаний на поверхности резания, при котором меняется глубина формообразующей лунки, в результате чего обработанная поверхность имеет волнистый профиль.

## Список литературы

1. Систематизация колебаний при концевом фрезеровании тонкостенных элементов деталей / С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, Э. В. Кондратюк и др. // Вестник двигателестроения. – № 1. – 2016. – С. 68–71.
2. Пат. 103031 Україна, МПК (2006) G01N11/00, G01M7/02. Стенд для оцінки коливального процесу деталі при циліндричному фрезеруванні, Внуков Ю. М., Гермашев А. І., Кучугуров М. В., Дядя С. І., Козлова О. Б., заявник та власник патенту ЗНТУ – №u201506355 ; заявл. 26.06.2015 ; опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22.
3. Конструкция экспериментальной концевой цилиндрической фрезы с изменяемыми углами винтовых режущих кромок. / С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, Э. В. Кондратюк, А. В. Шевченко // Вестник двигателестроения. – № 1. – 2014. – С. 71–74.
4. Пат. UA 106903 Україна, МПК (2016.01) G01N 11/00, G01M 7/02, Спосіб визначення умов фрезерування визначенням довжини фактичного контакту інструмента зі зразком при кінцевому фрезеруванні тонкостінних деталей Внуков Ю. М., Логоминов В. О., Гермашев А. І., Дядя С. І., Козлова О. Б., Черновол Н.М., заявник та власник патенту Запорізький національний технічний університет. – u 201511270 ; заявл. 16.11.2015 ; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9.
5. Логоминов В. А. Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: дис. канд. техн. наук : 05.03.01: защищена 21.02.2013: утв. 25.04.2013 / Логоминов Виктор Алексеевич. – Запорожье, 2013. – 226 с.
6. Анализ условий контактирования зубьев концевой цилиндрической фрезы с деталью / Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, Н. Н. Черновол // Журнал инженерных наук. – 2014. – Т. 1. – № 4. – С. 1–7.

Одержано 26.05.2017

### **Дядя С.І. Дослідження механізму порушення автоколивань при кінцевому фрезеруванні тонкостінного елемента деталі**

*Наведені результати експериментального дослідження кінцевого фрезерування тонкостінних елементів деталей. Розглянуто механізм формування автоколивань при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні і його вплив на процес різання.*

**Ключові слова:** тонкостінний елемент деталі, регенеративні автоколивання, час різання, довжина контакту, період автоколивань.

### **Diadia S. Investigation of the mechanism of excitation of self-oscillations in the final milling of a thin-walled element of a part**

*This article presents the experimental research of end milling of thin-wall parts. The mechanism of chatter's formation during the following end cylindrical milling and its influence on the cutting process are considered.*

**Key words:** thin-wall part, regenerative self-oscillation, cutting time, contact length, period of self-oscillations.