

УДК 621.914.1

- Мозговой В. Ф.** канд. техн. наук, гл. технолог АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: [ugt@motorsich.com](mailto:ugt@motorsich.com);
- Дядя С. И.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: [djadja@zntu.edu.ua](mailto:djadja@zntu.edu.ua);
- Козлова Е. Б.** канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: [kozlova@zntu.edu.ua](mailto:kozlova@zntu.edu.ua);
- Логоминов В. А.** канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, [logominov@rambler.ru](mailto:logominov@rambler.ru);
- Зубарев А. Е.** аспирант кафедры технологии машиностроения Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: [andreyzub@gmail.com](mailto:andreyzub@gmail.com)

## ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ КОНЦЕВОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ В УСЛОВИЯХ АВТОКОЛЕБАНИЙ

**Цель работы.** Показать механизм формирования профиля поверхности детали при концевом цилиндрическом фрезеровании в условиях автоколебаний.

**Методы исследования.** Для проведения исследований использовали экспериментальный метод с применением стенда, конструкция которого позволяет создавать различные условия обработки тонкостенных элементов деталей, записывать колебания в процессе резания, отдельно изучать влияние на их возбуждение и поддержание упругой системы детали, режимов резания и геометрии инструмента. Фрезерование выполняли однозубой фрезой с режимами резания, при которых возникают автоколебания. Для определения закономерностей движения детали при резании использовали метод совмещения фрагментов осциллограммы.

**Полученные результаты.** Проанализирована схема формирования профиля обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании в условиях возникновения автоколебаний. Для этого получены поверхности резания путем быстрого вывода инструмента из детали. Экспериментально показано, что впадины и выступы на поверхностях резания согласовываются с контуром полученных фрагментов осциллограммы, которые использовали в дальнейшем при анализе изменений поверхности резания. Получена формула для определения количества впадин от автоколебаний, остающихся на обработанной поверхности после одного реза. При совмещении фрагментов осциллограмм относительно точки врезания инструмента наблюдается периодичность изменения высоты последних волн автоколебаний на фрагментах осциллограммы от наибольшего значения до наименьшего. Периодически изменяется и время резания. При этом с его увеличением высота последней волны автоколебаний уменьшается. Сопоставление профиля поверхности с профилем, построенным по значениям высот последних волн автоколебаний, взятых с фрагментов осциллограммы, показывает их идентичность. Это объясняет механизм образования волнистости на обработанной поверхности и позволяет определить ее параметры. Выведена формула для расчета шага волнистости.

**Научная новизна.** Разработана методика получения поверхности резания при концевом фрезеровании путем выведения детали из зоны резания при вертикальном опускании стола. Установлено, что профиль осциллограммы идентичен поверхности резания и по ней можно изучать изменение последней. Показано, что волнистость обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании образуется периодическим повторением впадин различной глубины, которые остаются на поверхности резания после врезания инструмента в деталь в условиях автоколебаний.

**Практическая ценность.** Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования точности обработки и качества поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании в условиях возникновения автоколебаний.

**Ключевые слова:** фрезерование; автоколебания; поверхность резания; тонкостенный элемент детали; осциллограмма.

### ВВЕДЕНИЕ

В условиях черновой и получистовой обработки тонкостенных элементов деталей, широко

распространенных в авиакосмической отрасли промышленности, в определенном скоростном диапазоне возникают автоколебания. Полученная

© Мозговой В. Ф., Дядя С. И., Козлова Е. Б., Логоминов В. А., Зубарев А. Е., 2018  
DOI 10.15588/1727-0219-2018-1-13

при этом погрешность формы обработанной поверхности, влияет на точность и качество последующей чистовой обработки.

### 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Профиль обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании формируется в виде сочетания выступов и впадин от врезания каждым зубом инструмента, повторяющихся с периодом, равным подаче на зуб  $S_z$ .

Впадины образуются при врезании зуба фрезы в обрабатываемую поверхность, а высота выступов —  $R$ , связана с радиусом инструмента —  $R_{фр}$  и величиной подачи на зуб —  $S_z$  (рис. 1).

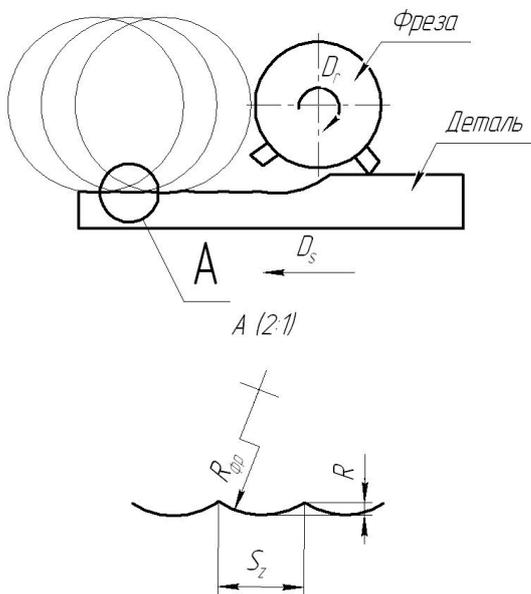


Рисунок 1. Схема формирования профиля поверхности при цилиндрическом фрезеровании

При фрезеровании в условиях возникновения автоколебаний обработанная поверхность, помимо следов от резания каждым зубом инструмента, имеет волнистый профиль с шагом —  $S_w$  (рис. 2).

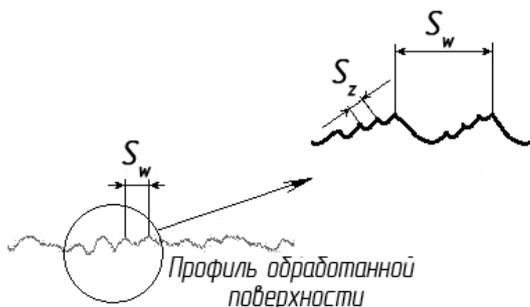


Рисунок 2. Профиль поверхности после цилиндрического фрезерования с автоколебаниями

Несмотря на то, что о формировании волнистости обработанной поверхности в условиях возникновения автоколебаний при цилиндрическом фрезеровании говорится в ряде работ [1]–[3], механизм ее образования недостаточно изучен.

### 2 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью статьи является исследование механизма формирования профиля обработанной поверхности после концевом цилиндрического фрезерования в условиях автоколебаний.

### 3 ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования влияния автоколебаний на формирование профиля обработанной поверхности проводили на специальном стенде [4, 5], конструкция которого позволяет воспроизводить условия возбуждения автоколебаний при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей, записывать осциллограммы колебания детали при фрезеровании. Стенд оснащен электроконтактным устройством, позволяющим фиксировать время резания: от врезания инструмента в деталь и до его выхода из зоны контакта, а также устройством для записи профиля обработанной поверхности.

Фрезерование выполняли на вертикально фрезерном станке FWD-32J специальной однозубой фрезой диаметром  $d_{фр} = 30$  мм, с углом наклона зуба  $\omega = 0^\circ$  и частотой собственных колебаний  $f_{ин} = 1041$  Гц. Материал режущей части фрезы — твердый сплав ВК8, материал образца — Ст. 3 ГОСТ 380-2005. Размеры образца —  $50 \times 25 \times 3,4$  мм. Упругий элемент, воспроизводящий тонкостенный элемент детали, толщиной  $h = 6$  мм и вылетом  $L = 80$  мм имел частоту свободных колебаний  $f_{скз} = 390$  Гц.

Для фрезерования в третьей скоростной зоне [6] были установлены режимы резания, при которых всегда будут возникать автоколебания:

- частота вращения шпинделя  $n = 355$  об/мин;
- радиальная глубина резания  $a_e = 0,5$  мм;
- осевая глубина резания  $a_p = 3,4$  мм;
- подача на зуб  $S_z = 0,1$  мм.

Для изучения образования профиля обработанной поверхности необходимо иметь представление о поверхности резания. Поэтому для ее получения использовалась методика, при которой стол с деталью в процессе фрезерования перемещался вертикально вниз, выводя инструмент из детали. На рис. 3 показана схема получения поверхностей резания  $Z_r$ , смещенных относительно друг друга в направлении движения заготовки на величину подачи на зуб —  $S_z$ . При быстром перемещении стола вниз осевая глубина резания уменьшается, принимая значения  $b_1$ ,  $b_2$  и  $b_3$ .

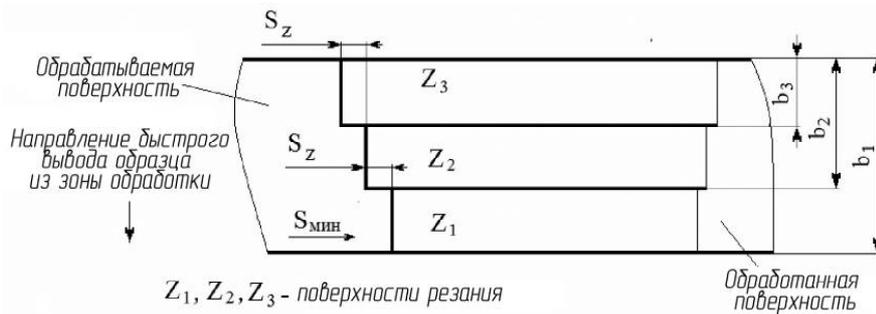


Рисунок 3. Схема образования поверхностей резания при быстром выводе образца из зоны резания

Использование при записи осциллограмм электроконтактного устройства позволяет выделять на ней фрагменты, соответствующие резу одним зубом фрезы. При этом можно точно определить точку начала контакта и точку конца контакта инструмента и детали, возможное прерывание контакта, а также время резания —  $t_{рез}$  (рис. 4). Верхняя горизонтальная линия «да», записанная электроконтактным устройством, указывает на наличие контакта инструмента с деталью. Нижняя горизонтальная линия «нет» указывает на его отсутствие.

На рис. 5 показаны поверхности резания —  $Z_i$  на образце, полученные экспериментально. Сравнение их с профилем фрагментов осциллограммы, соответствующих резам, при которых эти поверхности были получены, показывает идентичность расположения на них впадин и выступов. Это дает возможность по форме записанных фрагментов осциллограммы оценивать форму поверхностей резания.

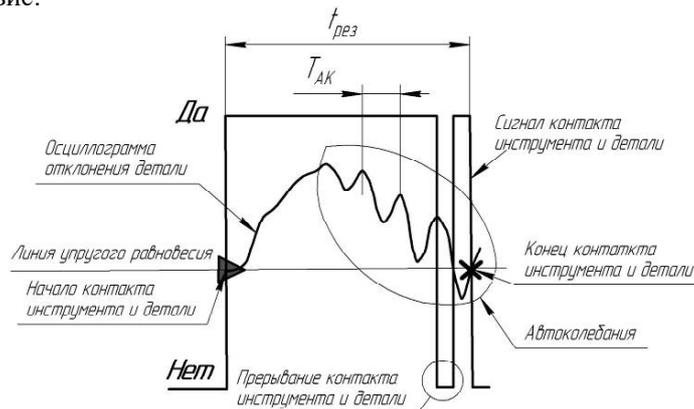


Рисунок 4. Фрагмент осциллограммы колебания тонкостенного элемента детали (попутное фрезерование)

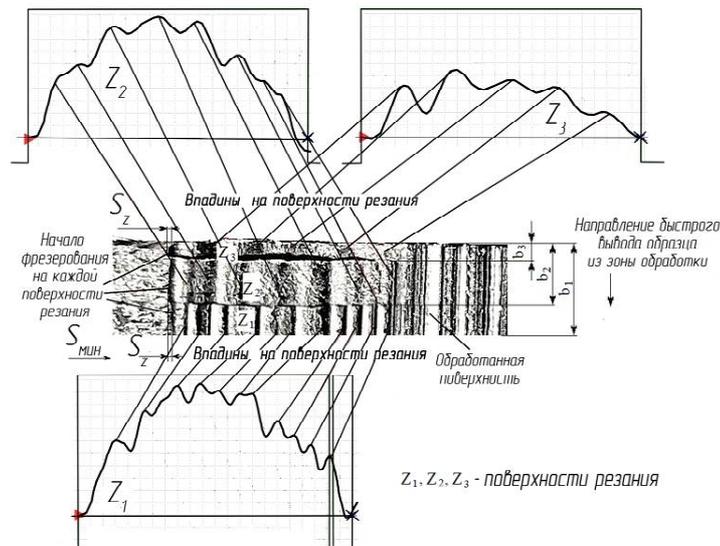


Рисунок 5. Сравнение фрагментов осциллограммы с поверхностями резания, полученных экспериментально

Исходя из того, что обработанная поверхность при концевом фрезеровании формируется из несрезаемых участков поверхности резания, необходимо определить, сколько впадин, образованных при резании с автоколебаниями не удаляется. Для этого необходимо сравнить шаг автоколебаний  $h$  с подачей на зуб  $S_z$ .

Шаг автоколебаний рассчитывается по формуле:

$$h = \frac{L_{рез} \cdot T_{AK}}{t_{рез}}, \quad (1)$$

где  $L_{рез}$  – длина поверхности резания, мм;

$t_{рез}$  – время резания, с;

$T_{AK}$  – период автоколебаний, с.

Период автоколебаний и время резания определяются по фрагментам осциллограммы, записанных при фрезеровании. Длина поверхности резания рассчитывается по формуле:

$$L_{рез} = v_{рез} \cdot t_{рез}, \quad (2)$$

где  $v_{рез}$  – скорость резания, мм/с.

Скорость резания рассчитывается по формуле:

$$v_{рез} = \frac{\pi \cdot d_{фр} \cdot n}{60}, \quad (3)$$

где  $d_{фр}$  – диаметр фрезы, мм;

$n$  – частота вращения фрезы, об/мин.

Количество впадин от автоколебаний  $m$ , остающиеся на поверхности резания, определяется как отношение подачи на зуб  $S_z$  и шага волн автоколебаний  $h$  по формуле:

$$m = \frac{S_z}{h}. \quad (4)$$

Данные, полученные при проведении экспериментов, и расчетные значения, необходимые для определения количества впадин от автоколебаний, остающихся на обработанной поверхности, приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Данные для определения количества впадин от автоколебаний, остающихся на обработанной поверхности

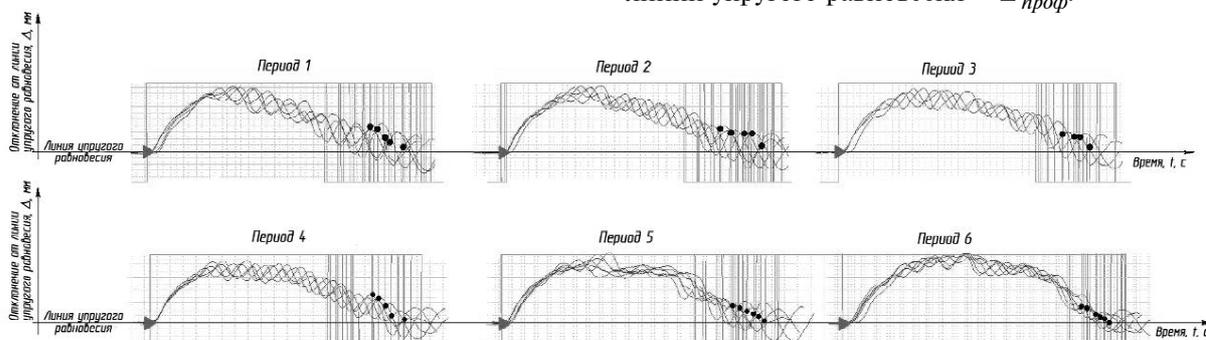
$t_{рез}$ , с	$v_{рез}$ , мм/с	$L$ , мм	$T_{AK}$ , с	$h$ , мм	$m$
0,01074	557	5,98	0,00174	0,97	0,1

Полученное значение  $m < 1$  говорит о том, что шаг автоколебаний больше подачи на зуб и от поверхности резания на обработанной остается одна впадина, вырезанная при автоколебаниях. Особенностью попутного фрезерования является то, что на обработанной поверхности остается участок поверхности резания, который формируется при выходе инструмента. Поэтому в проведенных исследованиях при попутном фрезеровании рассматривалась глубина последней впадины, оставленной автоколебаниями.

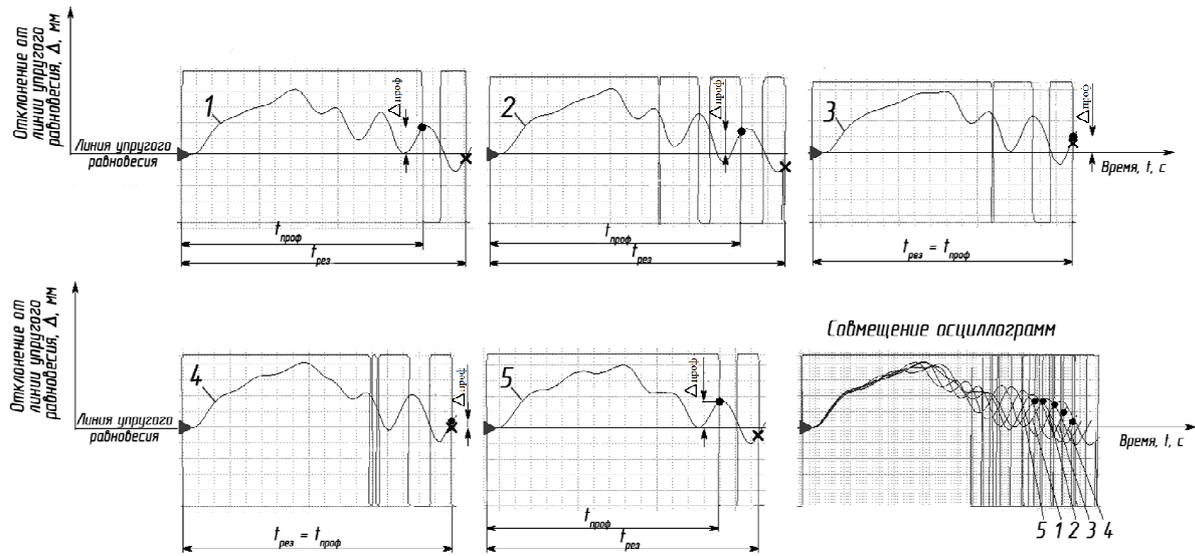
Для определения закономерностей, которые проявляются при формировании профиля обработанной поверхности, был использован метод совмещения фрагментов осциллограммы. При этом, для оценки изменений поверхности резания, на фрагментах осциллограммы были отмечены точки на волнах автоколебаний, соответствующие последним впадинам, которые остаются на обработанной поверхности.

При совмещении фрагментов осциллограммы проявилась закономерность периодического изменения отмеченных точек от наибольшего значения до наименьшего относительно линии упругого равновесия. На рис. 6 показаны объединенные в периоды последовательные фрагменты осциллограммы, у которых наблюдалась такая периодичность. Следует также отметить, что такая цикличность наблюдается на всей осциллограмме.

Для более подробного рассмотрения отмеченной закономерности, на рис. 7 показаны отдельные последовательные фрагменты осциллограммы, формирующие один из периодов. На фрагментах указано время резания  $t_{рез}$ , время до последней волны автоколебаний  $t_{проф}$  и отклонение последней волны автоколебаний от линии упругого равновесия  $\Delta_{проф}$ .



**Рисунок 6.** Периодичность изменения точек на последних волнах автоколебаний относительно линии упругого равновесия



**Рисунок 7.** Фрагменты последовательных резов, образующих один период изменения отклонения последней волны автоколебаний от линии упругого равновесия

При совмещении фрагментов осциллограммы относительно начала врезания инструмента в деталь видно, что каждая отмеченная точка смещается вправо относительно предыдущей, т.е. волны автоколебаний каждого последующего реза сдвигаются в сторону выхода инструмента из детали. При этом, наблюдается та же периодичность, что и при изменении времени резания –  $t_{рез}$  [7]. Вначале, при его наименьшем значении, отклонение –

$\Delta_{проф}$  наибольшее, затем, с увеличением времени резания отклонение уменьшается. Такой же характер изменения имеет и время от врезания до последней волны автоколебаний –  $t_{проф}$ . В табл. 2 приведены полученные экспериментально значения  $t_{проф}$  и  $\Delta_{проф}$  для фрагментов осциллограммы, образующих периоды, показанные на рис. 6.

На основании данных табл. 2 построены графики зависимости  $t_{проф}$  и  $\Delta_{проф}$  от номера реза (рис. 8, рис. 9).

**Таблица 2.** Значения  $t_{проф}$  и  $\Delta_{проф}$

Номер периода	1					2							
	Номер реза	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
$t_{проф}, с$	0,01035	0,01044	0,01113	0,01122	0,01179	0,01017	0,01059	0,01119	0,01128	0,01188			
$\Delta_{проф}, мм$	0,047	0,0438	0,036	0,0214	0,017	0,038	0,036	0,035	0,033	0,016			
Номер периода	3				4								
	Номер реза	11	12	13	14	15	16	17	18	19			
$t_{проф}, с$	0,01032	0,01083	0,01092	0,01155	0,01029	0,01053	0,01089	0,01113	0,01173				
$\Delta_{проф}, мм$	0,068	0,0438	0,0258	0,017	0,0614	0,0587	0,0414	0,019	0,0092				
Номер периода	5					6							
	Номер реза	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
$t_{проф}, с$	0,01077	0,01095	0,0114	0,0117	0,01185	0,01224	0,01137	0,01143	0,01161	0,01164	0,012	0,01221	0,01239
$\Delta_{проф}, мм$	0,0605	0,0516	0,0468	0,0268	0,02	0,0151	0,059	0,0577	0,058	0,0346	0,02	0,018	0,013

Как показывают результаты экспериментов, периодичность изменения времени от врезания до последней волны автоколебаний и ее отклонение от линии упругого равновесия имеют тесную отрицательную взаимосвязь, выраженную коэффициентом корреляции, равным (- 0,9), то есть с увеличением времени от врезания до последней волны автоколебаний -  $t_{проф}$  отклонение последней волны автоколебаний от линии упругого равновесия -  $\Delta_{проф}$  уменьшается.

На основании того, что фрагменты осциллограммы характеризуют поверхность резания, можно сказать, что последняя волна автоколебаний является последней впадиной, которая вырезается на поверхности резания. Изменение ее глубины формирует волнистость на обработанной поверхности. Для подтверждения этого было выполнено сравнение шагов волнистости на записанной после обработки профилограмме и шага -  $S_w$  изменения отклонения  $\Delta_{проф}$  (табл. 2).

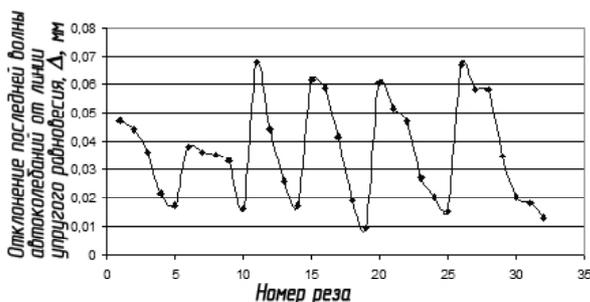


Рисунок 8. Изменение величины отклонения последней волны автоколебаний от линии упругого равновесия -  $\Delta_{проф}$

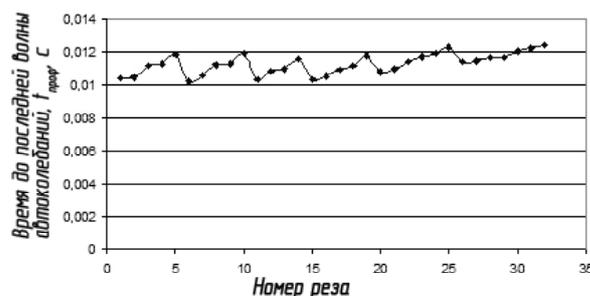


Рисунок 9. Изменение величины времени от врезания до последней волны автоколебаний -  $t_{проф}$

Шаг -  $S_w$  изменения отклонения  $\Delta_{проф}$  рассчитывается по формуле:

$$S_w = \Delta t \cdot \frac{\pi \cdot d_{фр} \cdot n}{60}, \quad (5)$$

где  $\Delta t$  - разность между временем конца -  $t_{профК}$  и начала -  $t_{профН}$  периода изменения  $\Delta_{проф}$ :

$$\Delta t = t_{профК} - t_{профН};$$

$d_{фр}$  - диаметр фрезы, мм;

$n$  - частота вращения шпинделя, об/мин.

При записи колебаний во время фрезерования и записи профиля обработанной поверхности скорость перемещения стола с образцом была одинаковой. Это позволило довольно точно определить участок на профилограмме (рис. 10), полученный резами, которые соответствуют фрагментам осциллограммы, приведенным на рис. 6.

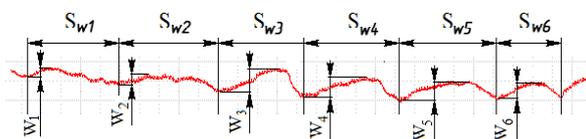


Рисунок 10. Участок профилограммы

В табл. 3, 4 приведены измеренные и рассчитанные значения шага -  $S_w$  и высоты -  $W$  волнистости обработанной поверхности.

Таблица 3. Сравнение рассчитанных и измеренных значений шага -  $S_w$  волнистости

№	$S_{wизм}$ , мм	$S_{wрасч}$ , мм	Погрешность, %
1	0,82	0,8	3
2	0,88	0,95	8
3	0,71	0,68	5
4	0,83	0,8	4
5	0,85	0,82	4
6	0,58	0,55	6

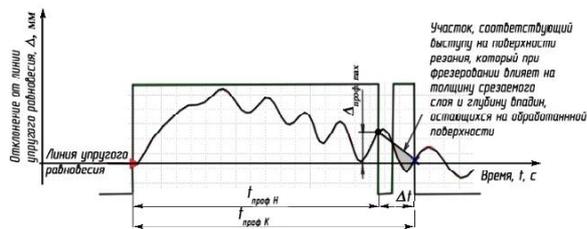
Таблица 4. Сравнение рассчитанных и измеренных значений высоты -  $W$  волнистости

№	$W_{изм}$ , мм	$W_{расч}$ , мм	Погрешность, %
1	0,039	0,047	17
2	0,035	0,038	8
3	0,07	0,068	3
4	0,062	0,061	2
5	0,058	0,0605	8
6	0,56	0,059	5

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что наибольшая погрешность между измеренными значениями шага и высоты волнистости и рассчитанными по фрагментам осциллограммы не превышают 17%. На основании этого можно объяснить образование волнистости на обработанной поверхности, связанное с тем, что глубины впадин, формирующих обработанную поверхность, разные и изменение их, как показано выше, периодически повторяется.

Для объяснения изменения величины отклонения последней волны автоколебаний от линии упругого равновесия и формирования шага волнистости обработанной поверхности рассмотрим

фрагмент осциллограммы, с которого начинается период изменения величины отклонения последней волны автоколебаний от линии упругого равновесия —  $\Delta_{\text{проф}}$ , и она имеет наибольшее значение (рис. 11). Если данный фрагмент сопоставить с соответствующей ему поверхностью резания, то на ней выделен участок последнего выступа, который срезается при движении подачи. При этом толщина сечения срезаемого слоя, влияющая на демпфирование автоколебаний, меняется от наименьшего значения до наибольшего. В результате на каждом резе уменьшается амплитуда последней волны автоколебаний и соответственно ее отклонение от линии упругого равновесия. После срезания выступа демпфирующего участка уже нет, амплитуда последней волны автоколебаний возрастает и начинается новый период ее изменения, но уже при срезании нового выступа.



**Рисунок 11.** Фрагмент осциллограммы, по которому определяется шаг волнистости на обработанной поверхности

## ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований установлены основные принципы оценки волнистости обработанной поверхности при попутном цилиндрическом фрезеровании в зависимости от динамического состояния обрабатываемой системы при наличии в ней маложестких элементов.

1. При попутном концевом цилиндрическом фрезеровании волнистый профиль обработанной поверхности обусловлен волнистой формой поверхности резания.

2. Количество волн на поверхности резания, остающееся на обработанной поверхности, зависит от периода автоколебаний и подачи на зуб.

3. Экспериментально установлено, что при попутном цилиндрическом фрезеровании на обработанной поверхности остается последняя впадина, образованная последней волной автоколебаний.

4. Глубина впадины остающейся на обработанной поверхности детали периодически меняется от наибольшего значения до наименьшего, формируя высоту и шаг волнистости на ней.

5. По записанным фрагментам осциллограммы колебаний детали при концевом цилиндрическом фрезеровании можно исследовать формирование профиля обработанной поверхности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. 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.
- [2]. Внуков Ю. Н. Разработка методики оценки уровня автоколебаний тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании / Ю. Н. Внуков, А. И. Гермашев, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, П. А. Каморкин // Сучасні технології в машинобудуванні. — 2015. — Вип. 10. — С. 3–13.
- [3]. Розенберг Ю. А. Резание материалов / Ю. А. Розенберг: Учебник для техн. вузов. — Курган: Изд-во ОАО «Полиграфический комбинат» Зауралье: 2007. — 294 с.: ил.
- [4]. Пат. UA 94974 Україна, МПК (2006) G01N11/00; G01M7/02, Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей / Логоминов В. О., Гермашев А. І., Дядя С. І., Козлова О. Б.; заявник та власник патенту Запорізький національний технічний університет. — у 201405981; заявл. 02.06.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. №23.
- [5]. Разработка комплекса экспериментальных методик исследования виброустойчивости процесса резания концевыми фрезами с разнонаклонными зубьями / [Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, А. Е. Зубарев] // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: зб. наукових праць [Текст]. — Вип. 3(8). — О.: Наука і техніка. — 2015. — С. 24–40.
- [6]. Дядя С. И. Систематизация колебаний при концевом фрезеровании тонкостенных элементов деталей / С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, Э. В. Кондрацюк, А. Е. Зубарев, В. А. Кришталь // Вестник двигателестроения. — №1. — 2016. — С.68–71.
- [7]. Дядя С. И. Исследование механизма возбуждения автоколебаний при концевом фрезеровании тонкостенного элемента детали / С. И. Дядя // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. — №1. — 2017. — С. 92–100.

Статья поступила в редакцию 20.04.2018

## ФОРМУВАННЯ ПРОФІЛЮ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ КІНЦЕВОМУ ЦИЛІНДРИЧНОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ В УМОВАХ АВТОКОЛИВАНЬ

- Мозговий В. Ф.** канд. техн. наук, гол. технолог АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна, e-mail: ugt@motorsich.com;
- Дядя С. І.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: djadja@zntu.edu.ua;
- Козлова О. Б.** канд. техн. наук, доцент кафедри технології машинобудування Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: kozlova@zntu.edu.ua;
- Логомінов В. О.** канд. техн. наук, доцент кафедри технології машинобудування Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: logominov@rambler.ru;
- Зубарєв А. Є.** аспірант кафедри технології машинобудування Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: andreyzub@gmail.com

**Мета роботи.** Показати механізм формування профілю поверхні деталі при кінцевому циліндричному фрезеруванні в умовах автоколиваний.

**Методи дослідження.** Для проведення досліджень використовували експериментальний метод з застосуванням стенду, конструкція якого дозволяє створювати різні умови обробки тонкостінних елементів деталей, записувати коливання в процесі різання, окремо вивчати вплив на їх збудження і підтримання пружної системи деталі, режимів різання і геометрії інструменту. Фрезерування виконували однозубою фрезою з режимами різання, при яких виникають автоколивання. Для визначення закономірностей руху деталі при різанні використовували метод поєднання фрагментів осцилограми.

**Отримані результати.** Проаналізовано схема формування профілю обробленої поверхні при кінцевому циліндричному фрезеруванні в умовах виникнення автоколиваний. Для цього отримані поверхні різання шляхом швидкого виведення інструменту з деталі. Експериментально показано, що западини та виступи на поверхнях різання узгоджуються з контуром отриманих фрагментів осцилограми, які використовували в подальшому при аналізі змін поверхні різання. Отримана формула для визначення кількості западин від автоколиваний, що залишаються на обробленій поверхні після одного різі. При суміщенні фрагментів осцилограм щодо точки врізання інструменту спостерігається періодичність зміни висоти останніх хвиль автоколиваний на фрагментах осцилограми від найбільшого значення до найменшого. Періодично змінюється і час різання. При цьому з його збільшенням висота останньої хвилі автоколиваний зменшується. Поєднання профілю поверхні з профілем, побудованим за значеннями висот останніх хвиль автоколиваний, взятих з фрагментів осцилограми, показує їх ідентичність. Це пояснює механізм утворення хвилястості на обробленій поверхні і дозволяє визначити її параметри. Виведено формулу для розрахунку кроку хвилястості.

**Наукова новизна.** Розроблено методуку отримання поверхні різання при кінцевому фрезеруванні шляхом виведення деталі із зони різання при вертикальному опусканні стола. Встановлено, що профіль осцилограми ідентичний поверхні різання і по ній можна вивчати зміну останньої. Показано, що хвилястість обробленої поверхні при кінцевому циліндричному фрезеруванні утворюється періодичним повторенням западин різної глибини, які залишаються на поверхні різання після врізання інструмента в деталь в умовах автоколиваний.

**Практична цінність.** Отримані результати можуть бути використані для прогнозування точності обробки і якості поверхні при кінцевому циліндричному фрезеруванні в умовах виникнення автоколиваний.

**Ключові слова:** фрезерування; автоколивання; поверхня різання; тонкостінний елемент деталі; осцилограма.

## FORMING OF PROFILE OF A TREAT SURFACE AT END-CAPPING CYLINDRICAL MILLING IN THE CONDITIONS OF SELF-EXCITED OSCILLATIONS

- Mozgovoy V. F.** Ph.D, Chief Technologist of Motor Sich JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: ugt@motorsich.com;
- Dyadya S. I.** Ph.D, Associate professor, Associate professor of the Technological Engineering department of the Zaporozhye National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: djadja@zntu.edu.ua;

- Kozlova Ye. B.** Ph.D, Associate professor of the Technological Engineering department of the Zaporozhye National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: kozlova@zntu.edu.ua;
- Logominov V. A.** Ph.D, Associate professor of the Technological Engineering department of the Zaporozhye National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: logominov@rambler.ru;
- Zubarev A. E.** graduate student of the Technological Engineering department of the Zaporozhye National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: andreyzub@gmail.com

**Purpose.** To show the mechanism of forming of profile of surface of detail at the end-capping cylindrical milling in the conditions of self-excited oscillations.

**Methodology.** For realization of researches used an experimental method with the use of stand, the construction of that allows to create the different terms of treatment of the thin-walled elements of details, write down vibrations in the process of cutting, separately to study influence on their excitation and maintenance of the resilient system of detail, modes of cutting and geometry of instrument. Milling was executed by a single-toothed milling cutter with the modes cutting there are self-excited oscillations at that. For determination of conformities to law of motion of detail at cutting used the method of combination of fragments of oscillogram.

**Findings.** The chart of forming of profile of a treat surface is analyzed at the end-capping cylindrical milling in the conditions of origin of self-excited oscillations. For this purpose cutting surfaces are got by the rapid conclusion of instrument from a detail. It is experimentally shown that cavities and ledges on the surfaces of cutting conform to the contour of the got fragments oscillograms that used in future for the analysis of changes of cutting surface. A formula is got for determining the amount of cavities from self-excited oscillations remaining on a treat surface after one cut. At combination of fragments of oscillograms in relation to the point of threading-in of instrument there is periodicity of change of height of the last waves of self-excited oscillations on the fragments of oscillogram from a most value to the least one. A time-in-cut changes periodically. Thus with his increase the height of the last wave of self-excited oscillations diminishes. Comparison of profile of surface with the profile built on the values of heights last.

**Originality.** Methodology of receipt of cutting surface is worked out at the end-capping milling by the leading out of detail from the zone of cutting at the vertical lowering of table. It is set that the profile of oscillogram is identical to the cutting surface and on her it is possible to study a change the last. It is shown that the waviness of a treat surface at the end-capping cylindrical milling appears the periodic reiteration of cavities of different depth, that remain on the surface of cutting after the threading-in of instrument in a detail in the conditions of self-excited oscillations.

**Practical value.** The got results can be drawn on for prognostication of exactness of treatment and quality of surface at the end-capping cylindrical milling in the conditions of origin of self-excited oscillations.

**Keywords:** milling; self-excited oscillations; cutting surface; thin-walled element of detail; oscillogram.

## REFERENCES

- [1]. Logominov V. A. (2013). Formirovanie sferohovatosti obrabotannoj poverhnosti pri koncevom cilindricheskom frezerovanii tonkostennyh jelementov detalej. (Diss. Kand. Tehn. Nauk.). Zaporozh'e, 226.
- [2]. Vnukov Ju. N., Germashev A. I., Dyadya S. I., Kozlova Y. B., Kamorkin P. A. (2015). Razrabotka metodiki ocenki urovnja avtokolebanij tonkostennoj detali pri ee koncevom frezerovanii [Development of a technique for estimating the level of self-oscillations of a thin-walled part with its end milling]. *Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni*, 10, 3–13. (in Russian)
- [3]. Rozenberg Ju. A. (2007). Rezanie materialov: Uchebnik dlja tehn. vuzov. Kurgan: Izd-vo OAO "Poli-graficheskij kombinat" Zaural'e.
- [4]. Logominov V. O., Germashev A. I., Dyadya S. I., Kozlova, O. B. (2006). Ukraïna. Patent No. 94974. Ukraïns'kij institut promislovoi vlasnosti.
- [5]. Vnukov Ju.N., Dyadya S.I., Kozlova E.B., Zubarev A.E. (2015). Razrabotka kompleksa jeksperimental'nyh metodik issledovanija vibrostojchivosti processa rezanija koncevymi frezami s raznonaklonnymi zub'jami [Development of a complex of experimental methods for studying the vibration resistance of the cutting process with end mills with multi-inclined teeth]. *Informacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobnictvi: zbirnik naukovih prac*, 3(8), 24–40. (in Russian)
- [6]. Dyadya S. I., Kozlova E. B., Kondratjuk E. V., Zubarev A. E., Krishtal V. A. (2016). Sistematizacija kolebanij pri koncevom frezerovanii tonkostennyh jelementov detalej [Systematization of vibrations during the end milling of thin-walled elements of parts]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 1, 68–71. (in Russian)
- [7]. Dyadya S. I. (2017). Issledovanie mehanizma vzbuzhdenija avtokolebanij pri koncevom frezerovanii tonkostennogo jelementa detail [Investigation of the excitation mechanism of auto-oscillations during the end milling of a thin-walled component of a part]. *Novye materialy i tehnologii v metallurgii i mashinostroenii*, 1, 92–100. (in Russian)