

С. Дядя, Е. Козлова, А. Гермашев,
М. Кучугуров, Запорожье, Украина

ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДА АВТОКОЛЕБАНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ КОНЦЕВОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Аннотация. В статье показано, что шаг волнистости обработанной поверхности зависит от шага волнистости на поверхности резания, который в свою очередь, зависит от периода автоколебаний и скорости резания. Для выполнения исследований использовали методику проведения экспериментов на стенде, конструкция которого позволяет записывать осциллограммы колебания детали в процессе фрезерования, разделять их на фрагменты и изучать влияние полученных параметров осциллограмм на параметры качества обработанной поверхности. Авторами приведены результаты исследований влияния периода автоколебаний на величину шага волнистости на поверхности резания. Показано, что с увеличением частоты вращения шпинделя на поверхности резания уменьшается количество волн, но увеличивается их основание и шаг между ними. Для срезания основания требуется большее количество резов инструментом, поэтому на обработанной поверхности с увеличением частоты вращения увеличивается шаг волнистости. Увеличение подачи приводит к увеличению толщины сечения срезаемого слоя, уменьшению периода автоколебаний и шага волнистости на поверхности резания. Поэтому с увеличением подачи уменьшается шаг волнистости на обработанной поверхности. Получены уравнения регрессии между шагом волнистости на поверхности резания и на обработанной поверхности. Показано, что с увеличением периода свободных колебаний детали при фрезеровании увеличивается период автоколебаний. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования параметров качества обработанной поверхности в зависимости от динамических условий при встречном концевом цилиндрическом фрезеровании.

Ключевые слова: фрезерование; автоколебания; профилограмма; осциллограмма; амплитуда, шаг волнистости.

Введение. Влияние автоколебаний, характеризующихся амплитудой и периодом, на качество обработанной поверхности, стойкость инструмента, производительность рассматривается в работах многих исследователей, изучающих точность обработки на металлорежущих станках. Наибольшее внимание при этом уделяется изучению влияния амплитуды автоколебаний [1–6], с увеличением которой увеличивается износ инструмента. Для ее снижения, как правило, уменьшают скорость резания, что влияет на производительность. Считается, что приемлемой для амплитуды может быть величина до 0,020 мм, при которой облегчается процесс стружкообразования и повышается стойкость инструмента [1]. Период автоколебаний, независимо от изменения

величины амплитуды, при обработке практически одинаков и его роль в образовании обработанной поверхности остается малоисследованной. Однако в работах [7, 8] показано, что при встречном концевом цилиндрическом фрезеровании, в третьей скоростной зоне, период автоколебаний определяет шаг волнистости на поверхности резания. Эта волнистость, при срезании припуска, формирует переменную толщину его сечения, что влияет на демпфирующую способность упругой системы «инструмент – деталь» и величину отклонения первой волны автоколебаний от положения упругого равновесия (ПУР). Впадины, вырезаемые при этом, формируют волнистый профиль обработанной поверхности. Оценить форму поверхности резания не представляется возможным, потому что она срезается каждым последующим зубом инструмента. Однако, из-за имеющейся идентичности между формой траектории колебания детали при фрезеровании и соответствующей поверхностью резания [7], для ее исследования можно использовать осциллограммы, полученные при экспериментах. Иными словами, по осциллограмме колебаний детали при фрезеровании можно судить об изменениях на поверхностях резания. Благодаря тому, что осциллограммы и профилограммы записываются в цифровом виде, по ним возможно определение геометрических параметров волнистости, как на поверхности резания, так и на обработанной поверхности.

Изложение основного материала. В данной работе описаны исследования влияния периода автоколебаний на образование профиля обработанной поверхности детали при встречном концевом фрезеровании по осциллограммам колебательного движения детали [8] и профилям обработанной поверхности, полученным после обработки.

Исследования проводились как с образцами, имеющими одинаковое значение частоты свободных колебаний (ЧСК), но обработанных при разных режимах, так и образцами, имеющими разные ЧСК и обработанные при одинаковых режимах. Это позволит определить взаимосвязь между частотами свободных колебаний детали и автоколебаний при фрезеровании для прогнозирования точности обработки на основании известных ЧСК.

Частоты вращения шпинделя, при которых проводилось фрезерование, выбирались таким образом, чтобы обработка проходила в третьей скоростной зоне, т. е. выполнялось определяющее соотношение [8]:

$$1 \leq \frac{t_{pec}}{T_{СК}} \leq 7. \quad (1)$$

где t_{pec} – время резания, с;

$T_{СК}$ – период свободных колебаний детали.

Время резания рассчитывалось по формулам, приведенным в [8], для следующих условий:

1. Инструмент – однозубая, прямозубая, специальная фреза $\varnothing 50$ мм с регулируемым положением зуба [8], материал режущей части ВК8; частота свободных колебаний $f_{СК} = 833$ Гц.

2. Режимы резания:

- подача на зуб $S_z = 0,1$ мм;
- осевая глубина резания $a_p = 3,4$ мм;
- радиальная глубина резания $a_e = 0,5$ мм;

В табл. 1 приведены значения принятых частот вращения шпинделя.

Таблица 1 – Частоты вращения шпинделя в третьей скоростной зоны

$n_{шт}$, об/мин					
180	224	280	355	450	560

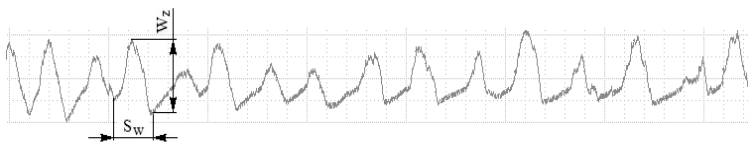
Фрезерование выполнялось на вертикально-фрезерном станке FWD-32J. Материал образцов – Сталь 3кп ГОСТ 380-2005. Образцы закреплялись в упругом элементе с характеристиками:

- вылет $L = 80$ мм;
- ширина $b = 60$ мм;
- толщина $h = 6$ мм;
- частота свободных колебаний $f_{СК} = 325$ Гц.

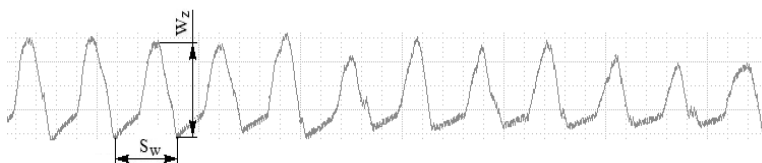
После фрезерования с помощью специального устройства [9], были записаны профилограммы обработанных поверхностей (рис. 1), определены средние значения шагов и высот волнистости, показанные в табл. 2.

Полученные результаты согласовываются с результатами работы [7], показывающей, что с увеличением частоты вращения шпинделя увеличиваются шаг и высота волнистости обработанной поверхности. Однако, новые данные говорят о том, что на поверхностях образцов, полученных после фрезерования с частотами вращения шпинделя $n = 450$ об/мин и выше (рис. 1), волнистость проявляется слабее, чем при фрезеровании на более низких частотах. При этом на обработанной поверхности после фрезерования с частотой вращения шпинделя $n = 560$ об/мин волнистость отсутствует, но остается погрешность формы в виде отклонения от прямолинейности – Δ_* .

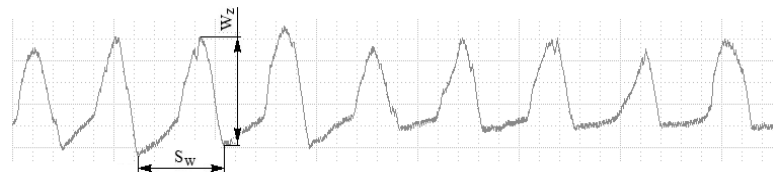
$n = 180$ об/мин



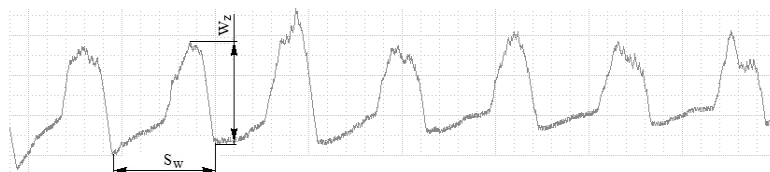
$n = 224$ об/мин



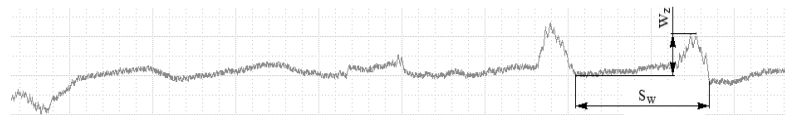
$n = 280$ об/мин



$n = 355$ об/мин



$n = 450$ об/мин



$n = 560$ об/мин

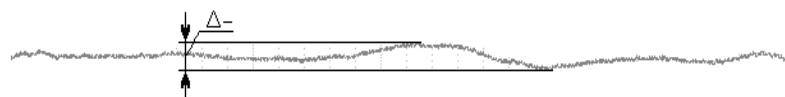


Рисунок 1 – Профиліограми оброблених поверхностей після зустрічного циліндричного фрезерування з різними частотами обертання шпинделя

Таблиця 2 – Средние значения шага и высоты волнистости обработанных поверхностей после встречного концевоего фрезерования при разных частотах вращения шпинделя

Частота вращения шпинделя $n_{шп}$, об/мин	Шаг волнистости W_z , мм	Высота волнистости S_w , мм
180	2,1	0,081
224	2,5	0,120
280	3,5	0,130
355	4,6	0,165
450	6,4	0,074
560	-	-

В табл. 3 приведены средние значения периодов автоколебаний при фрезеровании с разными частотами вращения шпинделя, которые показывают, что какой-либо закономерности изменения при этом нет.

Таблиця 3 – Средние значения периода автоколебаний

Частота вращения шпинделя, n , об/мин	180	224	280	355	450	560
Период автоколебаний, T_{AK} , мс	2,16	2,6	2,54	2,47	2,62	2,34

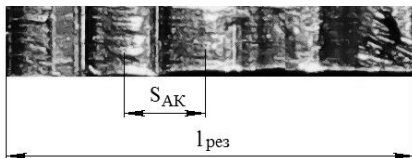
Близкие значения периодов автоколебаний говорят о том, что система с одинаковыми упругими свойствами независимо от частоты вращения шпинделя при фрезеровании колеблется с одинаковой частотой. Однако следует отметить, что при этом с увеличением частоты вращения шпинделя уменьшается время резания, а длина поверхности резания остается одинаковой, потому на ней размещается меньшее количество волн (рис. 2).

Это значит, что при одинаковом периоде автоколебаний с увеличением частоты вращения шпинделя шаг волнистости на поверхности резания – S_{AK} увеличивается. Его величину можно рассчитать по формуле:

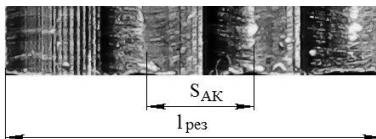
$$S_{AK} = T_{AK} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\partial\partial} \cdot n}{60}, \quad (2)$$

где $D_{фр}$ – диаметр фрезы, мм;
 n – частота вращения шпинделя, об/мин.
 T_{AK} – период автоколебаний.

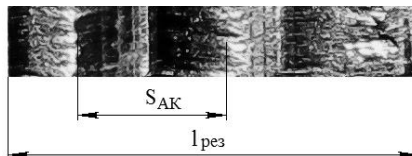
$n = 180$ об/мин



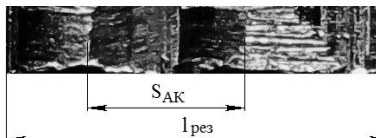
$n = 224$ об/мин



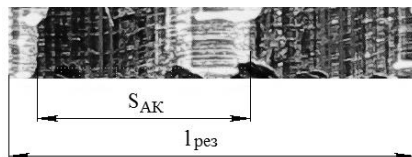
$n = 280$ об/мин



$n = 355$ об/мин



$n = 450$ об/мин



$n = 560$ об/мин

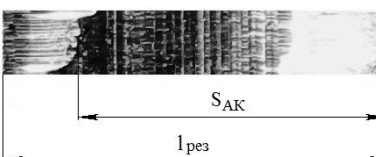


Рисунок 2 – Фотографии поверхностей резания после фрезерования с различными частотами вращения шпинделя

В табл. 4 представлены, рассчитанные по формуле (2), шаги волнистости на поверхности резания.

Таблица 4 – Рассчитанные шаги волнистости на поверхностях резания после фрезерования с разными частотами вращения шпинделя

Частота вращения шпинделя n , об/мин	180	224	280	355	450	560
Шаг волнистости S_{AK} , мм	1,18	1,63	2,01	2,42	3,15	3,64

На основании данных табл. 4 построен график зависимости, рис. 3.

Коэффициент корреляции между частотой вращения шпинделя – n и шагом волнистости на поверхности резания– S_{AK} равен 0,98. Уравнение, описывающее их взаимосвязь, имеет вид:

$$S_{AK} = 7 \cdot 10^{-8} \cdot n^3 - 8 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + 0,0347 \cdot n - 2,9329 \quad (3)$$

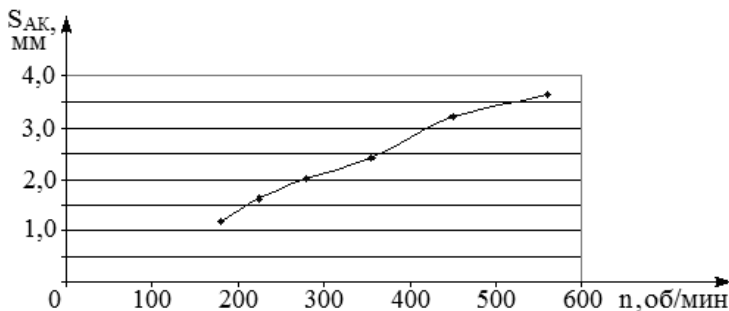


Рисунок 3 – График зависимости шага волнистости на поверхности резания – S_{AK} от частоты вращения шпинделя – n

На рис. 4 показан график зависимости между шагом волнистости на поверхности резания – S_{AK} и на обработанной поверхности – S_w . Коэффициент корреляции между этими параметрами равен 0,93. Уравнение, описывающее их взаимосвязь, имеет вид:

$$S_w = -0,7725 \cdot S_{AK}^3 + 5,3933 \cdot S_{AK}^2 - 9,5574 \cdot S_{AK} + 7,1285 \quad (4)$$

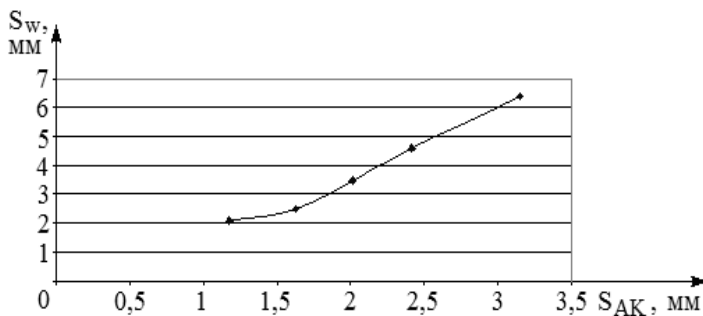


Рисунок 4 – График зависимости между шагами волнистости на поверхностях резания – S_{AK} и обработанных поверхностях – S_w

При увеличении шага волнистости на поверхности резания увеличивается ширина основания волны и для ее срезания требуется большее количество резов инструментом. Этим объясняется то, что при увеличении частоты вращения шпинделя увеличивается шаг волнистости на обработанной поверхности. Однако, следует отметить, что при

фрезерованим с частотами близькими к четвертой скоростной зоне колебаний ($n = 560$ об/мин), шаг волнистости больше, чем длина поверхности резания. Поэтому, нет периодичности ее срезания и большого перепада в положении вырезанных впадин на обработанной поверхности. В результате этого уменьшается погрешность ее формы.

Исходными данными для определения периода автоколебаний при фрезеровании с разными подачами были:

1. Инструмент – однозубая, прямозубая, специальная фреза $\varnothing 30$ мм, материал режущей части ВК8; частота свободных колебаний $f_{СК} = 833$ Гц.

2. Режимы резания:

- частота вращения шпинделя $n = 355$ об/мин;
- подача на зуб $S_z = 0,05$ мм; $0,1$ мм; $0,2$ мм; $0,3$ мм; $0,6$ мм;
- осевая глубина резания $a_p = 3,4$ мм;
- радиальная глубина резания $a_e = 0,5$ мм;
- направление подачи – встречное;
- резание свободное.

Фрезерный станок, обрабатываемый материал те же, что и в предыдущих исследованиях, ЧСК образца $f_{СК} = 390$ Гц.

В табл. 5 приведены результаты измерения периода автоколебаний – T_{AK} по осциллограммам, шага волнистости на обработанной поверхности – S_w по профилограммам и шаги волнистости на поверхности резания, рассчитанные по формуле (2).

Данные табл. 5 показывают, что при увеличении подачи уменьшаются и период автоколебаний, и шаг волнистости, как на поверхностях резания, так и на обработанной поверхности.

Таблица 5 – Периоды автоколебаний, шаги волнистости на обработанной поверхности и поверхности резания при фрезеровании с разными подачами

Подача S_z , мм/зуб	0,05	0,1	0,2	0,3	0,6
Период автоколебаний T_{AK} , мс	2,22	1,83	1,59	1,38	1,23
Шаг волнистости на обработанной поверхности S_w , мм	1,93	1,52	1,07	0,94	0,81
Шаг волнистости на поверхности резания S_{AK} , мм	2,03	1,7	1,39	1,28	1,14

На рис.5, 6 показаны графики зависимостей, построенные по данным табл. 5.

Уравнение регрессии между S_{AK} и S_z имеет вид (корреляционная зависимость – 0,87):

$$S_{AK} = 5,0407 \cdot S_z^2 - 4,7639 \cdot S_z + 2,1924 \quad (5)$$

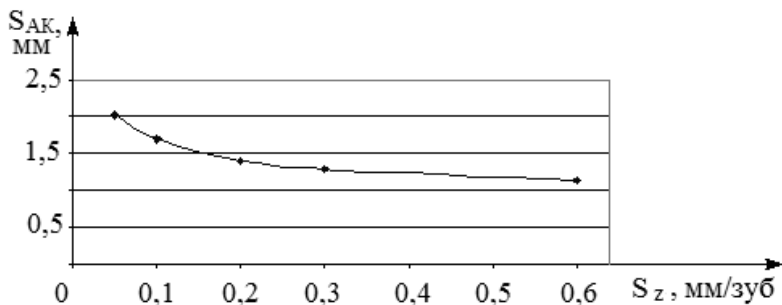


Рисунок 5 – График зависимости шага волнистости на поверхности резания – S_{AK} от подачи – S_z

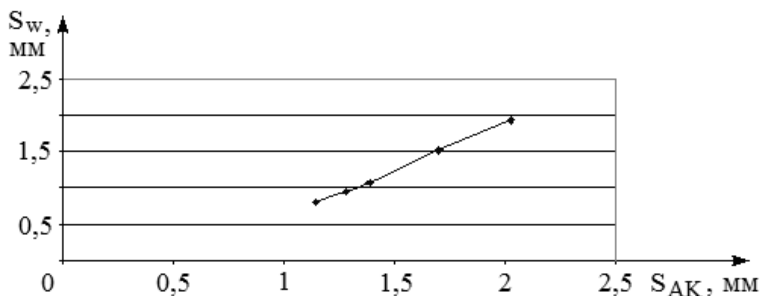


Рисунок 6 – График зависимости между шагами волнистости на поверхностях резания – S_{AK} и обработанных поверхностях – S_w

Уравнение регрессии, описывающее влияние шага волнистости на поверхности резания на шаг волнистости обработанной поверхности, имеет вид:

$$S_w = 0,1245 \cdot S_{AK}^2 + 0,8973 \cdot S_z - 0,3949 \quad (6)$$

Влияние подачи на период автоколебаний связано с изменением толщины сечения срезаемого слоя. При увеличении подачи увеличивается толщина сечения срезаемого слоя, жесткость упругой системы «инструмент-деталь», уменьшается период автоколебаний, соответственно, и шаг волнистости на поверхности резания. Для срезания выступов на ней при движении подачи требуется меньшее количество резов, поэтому уменьшается и шаг волнистости на обработанной поверхности.

Влияние исходного состояния образцов на формирование обработанной поверхности исследовалось при их одинаковой жесткости, но разной массе. При этом разными были частоты свободных колебаний.

Фрезерование выполнялось с частотой вращения шпинделя $n = 280$ об/мин при остальных исходных данных, как и в первом исследовании. Частоты свободных колебаний образцов – $f_{СК} = 325$ Гц, 390 Гц и 455 Гц.

Результаты, полученные после обработки осциллограмм и профилограмм, записаны в табл. 6.

По данным табл. 6 на рис. 7, 8 построены графики зависимостей.

Таблица 6 – Шаг волнистости на поверхности резания и обработанной поверхности при фрезеровании образцов с разными ЧСК

Частота свободных колебаний/период $f_{СК}/T_{СК}$, Гц/мс	Период автоколебаний $T_{АК}$, мс	Шаг волнистости на поверхности резания $S_{АК}$, мм	Шаг волнистости на обработанной поверхности S_w , мм
325/3,08	2,54	2,01	3,5
390/2,56	2,19	1,74	2,72
455/2,19	1,92	1,52	2,22

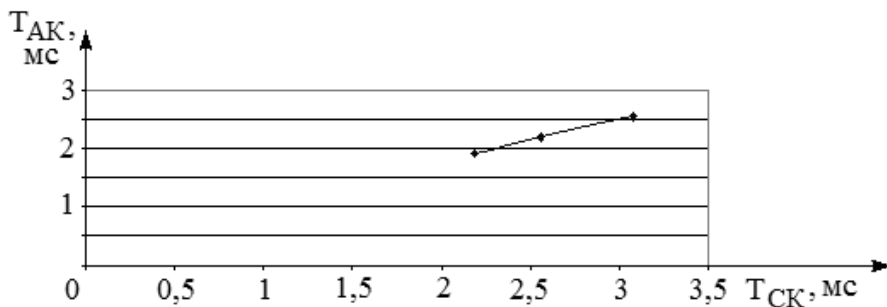


Рисунок 7 – График зависимости между периодом свободных колебаний – $T_{СК}$ и периодом автоколебаний – $T_{АК}$

Данные табл. 6 показывают, что чем больше период свободных колебаний детали, тем больше период автоколебаний при фрезеровании. Также, как и в выше представленных исследованиях, просматривается прямая корреляционная зависимость между шагами волнистости на поверхности резания и обработанной поверхности.

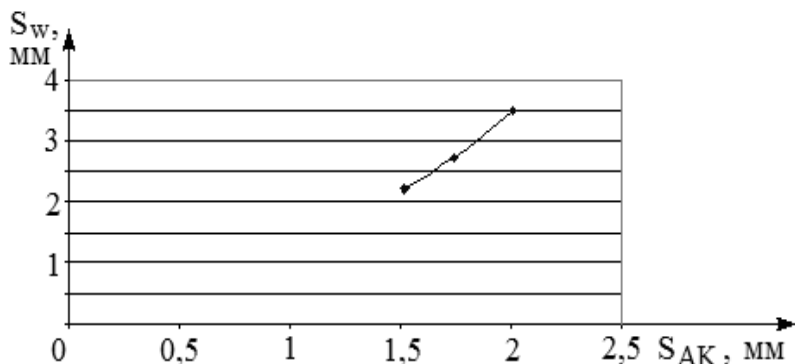


Рисунок 8 – Графік залежності між шагами волнистості на поверхнях різання – S_{AK} і оброблених поверхнях – S_w

Выводы.

1. Исследования показали, что на шаг волнистости на обработанной поверхности влияет шаг волнистости на поверхности резания, который зависит от периода автоколебаний и скорости резания.

2. Увеличение частоты вращения шпинделя приводит к увеличению шага волнистости на поверхности резания. На ней образуется меньше волн от автоколебаний, но их основание увеличивается. Так как при фрезеровании волнистые участки поверхности резания влияют на толщину сечения срезаемого слоя и на величины характеристик колебательного движения, то, в результате, на обработанной поверхности вырезаются впадины, формирующие ее волнистый профиль, с шагом, зависящим от шага волнистости на поверхности резания. Его увеличение с увеличением частоты вращения шпинделя требует для срезания большее число резов инструментом. Поэтому увеличивается шаг волнистости на обработанной поверхности.

При частоте $n = 560$ об/мин величина шага волнистости больше, чем длина поверхности резания. Поэтому нет периодичности его срезания и большого перепада в положении вырезанных впадин на обработанной поверхности, в результате этого волнистость на ней вырождается и уменьшается погрешность ее формы.

3. При увеличении подачи увеличивается толщина сечения срезаемого слоя. Происходит увеличение жесткости упругой системы «инструмент-деталь», уменьшается период автоколебаний и шаг волнистости на поверхности резания. Инструмент делает меньшее

количество резов для срезания выступов на ней, поэтому на обработанной поверхности уменьшается шаг волнистости.

4. С увеличением периода свободных колебаний детали период автоколебаний при фрезеровании также увеличивается.

Список использованных источников: 1. *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с. 2. *Каширин А.И.* Исследование вибраций при резании металлов / А. И. Каширин. – М.: Издательство АН СССР, 1944. – 132 с. 3. *Амосов И.С.* Экспериментальные и теоретические исследования вибраций при точении: автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук / И.С. Амосов. – Д., 1950. 4. *Свинин В.М.* Управление регенеративными автоколебаниями при фрезеровании на основе модуляции скорости резания: дисс. ... доктора техн. наук: 05.03.01 / Свинин Валерий Михайлович. – Иркутск, 2008. – 342 с. 5. *Altintas Y.* Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design / Y. Altintas. – 2013 – 365 p. 6. *Budak E.* Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi-Degree of Systems in Milling. Part I: Modeling / E. Budak, Y. Altintas // Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1998. – Vol. 120. – P. 22–30. 7. *Дядя С.И.* Исследование формирования обработанной поверхности тонкостенного элемента детали при концевом цилиндрическом фрезеровании с автоколебаниями / С.И. Дядя // Сучасні технології в машинобудуванні. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. Вип. 12. С. 5–18. 8. Автоколебания при фрезеровании тонкостенных элементов деталей [Электронный ресурс]: монография / [Внуков Ю.Н., Дядя С.И., Козлова Е. Б и др.]; под ред. Ю. Н. Внукова. – Электрон. данные. – Запорожье: ЗНТУ, 2017. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM) 12 см. – Название с тит. экрана. 9. *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. Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. Вып. 80. С. 32–37.

С. Дядя, О. Козлова, А. Гермашев,
М. Кучугуров, Запоріжжя, Україна

ВПЛИВ ПЕРІОДУ АВТОКОЛИВАНЬ НА ФОРМУВАННЯ ПРОФІЛЮ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ КІНЦЕВОМУ ЦИЛІНДРИЧНОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

Анотація. У статті показано, що крок хвилястості обробленої поверхні залежить від кроку хвилястості на поверхні різання, який в свою чергу, залежить від періоду автоколивань і швидкості різання. Для виконання досліджень використовували методику проведення експериментів на стенді, конструкція якого дозволяє записувати осцилограми коливань деталі в процесі фрезерування, розділяти їх на фрагменти і вивчати вплив отриманих параметрів осцилограм на параметри якості обробленої поверхні. Авторами наведено результати досліджень впливу періоду автоколивань на величину кроку хвилястості на поверхні різання. Показано, що зі збільшенням частоти обертання шпинделя на поверхні різання зменшується кількість хвиль, але збільшується їх основа і крок між ними. Для зрізання основи потрібна більша кількість різів інструментом, тому на обробленій поверхні зі збільшенням частоти обертання збільшується крок хвилястості. Збільшення подачі призводить до збільшення товщини перетину зрізаного шару, зменшення періоду автоколивань і кроку хвилястості на поверхні різання. Тому зі збільшенням подачі

зменшується крок хвилястості на обробленій поверхні. Отримано рівняння регресії між кроком хвилястості на поверхні різання і на обробленій поверхні. Показано, що при фрезеруванні зі збільшенням періоду вільних коливань деталі збільшується період автоколивань. Отримані результати можуть бути використані для прогнозування параметрів якості обробленої поверхні в залежності від динамічних умов при зустрічному кінцевому циліндричному фрезеруванні.

Ключові слова: фрезерування; автоколивання; профілограма; осцилограма; амплітуда, крок хвилястості.

S. Dyadya, O. Kozlova, A. Germashev,
M. Kuchugurov, Zaporozhye, Ukraine

THE EFFECT OF THE PERIOD OF CHATTER ON THE FORMATION OF A PROFILE OF PROCESSED SURFACE AT THE END CYLINDRICAL MILLING

Abstract. *The article shows that the wavy step of the machined surface depends on the waviness step on the cutting surface, which in turn depends on the period of chatter and the cutting speed. To carry out the research, we used the method of experiments on the stand, the design of which allows recording oscillograms of the part oscillation in the milling process, separating them into fragments and studying the effect of the obtained oscillogram parameters on the quality parameters of the processed surface. The authors present the results of studies of the influence of the period of chatter on the value of the wavy step on the cutting surface. It is shown that with an increase in the spindle rotation frequency on the cutting surface, the number of wave's decreases, but their base and pitch between them increase. To cut the base, a larger number of tool cuts are required, therefore, the wavy step increases with the frequency of rotation on the machined surface. An increase in feed leads to an increase in the thickness of the section of the layer being cut, a decrease in the period of chatter and a wavy step on the cutting surface. Therefore, with an increase in feed, the wavy step decreases on the treated surface. The regression equations between the waviness step on the cutting surface and on the machined surface are obtained. It is shown that when milling with an increase in the period of free oscillations, the period of self-oscillations increases. The results can be used to predict the quality parameters of the treated surface depending on the dynamic conditions during the opposite end cylindrical milling.*

Keywords: *milling; chatter; profilogram; waveform; amplitude, wavy step.*