

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.914.1

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук, **А.И. ГЕРМАШЕВ**,
С.И. ДЯДЯ, канд. техн. наук, **Е.Б. КОЗЛОВА**,
П.А. КАМОРКИН, канд. техн. наук, Запорозьє, Україна

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ ПРИ ЕЕ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

У статті описана методика визначення інтенсивності збудження автоколивань при кінцевому фрезеруванні тонкостінної деталі. Приведені експериментальні залежності впливу розмаху автоколивань в зоні профілювання - R_2 на шорсткість обробленої поверхні - Ra .

В статье описана методика определения интенсивности возбуждения автоколебаний при концевом фрезеровании тонкостенной детали. Приведены экспериментальные зависимости влияния размаха автоколебаний в зоне профилирования - R_2 на шероховатость обработанной поверхности - Ra .

In the article methodology of determination of intensity of excitation of self-excited oscillations is described at the end-milling of the thin-walled detail. Experimental dependences over of influence of scope of self-excited oscillations are brought in the zone of profiling - R_2 on the roughness of a treat surface - Ra .

Создание многокоординатных фрезерных станков с одновременным CNC управлением скоростью и направлением движения обрабатываемой детали и инструмента поставили новые задачи перед технологами.

Появились возможности с одной установки детали обрабатывать сложные поверхности ее элементов, которые могут быть тонкостенными.

В авиадвигателестроении такими деталями являются моноколеса компрессора с тонкостенными элементами - лопатками. К лопаткам предъявляются высокие требования по шероховатости и точности окончательных размеров, однако недостаточная жесткость приводит к

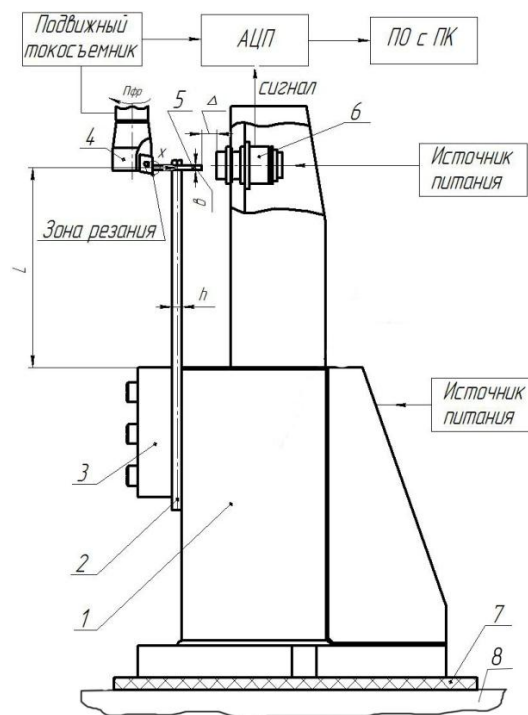
появлению вибраций при их окончательной обработке концевым фрезерованием. Установлено [1], что вид колебаний тонкостенных деталей в процессе фрезерования в каждый момент времени может быть различным. Во время врезания и выхода каждого очередного зуба фрезы в припуск деталь отклоняется от положения равновесия в результате вынужденных колебаний с «зубчатой» частотой, зависящей от скорости вращения фрезы и количества зубьев. В определенном скоростном диапазоне вращения инструмента на вынужденные отклонения детали дополнительно накладываются регенеративные автоколебания, связанные с резанием по волнистому следу на поверхности резания, оставленному предыдущим зубом фрезы. Частота этих автоколебаний значительно выше, чем «зубчатая» частота и зависит в основном от динамических характеристик упругих систем тонкостенной детали и концевой фрезы, а также условий контакта зуба фрезы и детали в период их зацепления при срезании припуска. Особенностью концевой фрезерования тонкостенных деталей является тот факт, что из-за малых величин радиальной – a_e и осевой – a_p глубин резания по сравнению с размерами диаметра фрезы, в резании участвует всегда только один зуб, поэтому в период холостого хода, когда предыдущий зуб фрезы уже вышел из зацепления с припуском, а последующий еще не вошел, тонкостенная деталь совершает свободные затухающие колебания с частотой собственных колебаний.

Таким образом, при концевом фрезеровании тонкостенной детали она может быть в состоянии возбуждения вынужденными колебаниями, вынужденными колебаниями с наложением автоколебаний и совершать свободные затухающие колебания.

Формирование шероховатости обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании происходит в **зоне профилирования** [2], которая является частью поверхности резания, оставшейся на обработанной поверхности в результате последовательного срезания припуска зубьями фрезы. Известно, что в скоростной зоне возбуждения регенеративных автоколебаний, связанных с появлением волнистости на поверхности резания резко ухудшается шероховатость [1]. Таким образом, существует прямая связь между возникновением автоколебаний в

тонкостенной детали при ее фрезеровании и шероховатостью обработанной поверхности.

Авторами статьи разработана оригинальная методика измерения всех видов колебаний возбуждаемых в тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании [3]. Подробное описание измерительного стенда приведено в работе [4], рис. 1. На стенде имеется две системы измерения. Первая измеряет отклонение тонкостенной пластины – 2 при помощи датчика перемещений – 6, а вторая – измеряет наличие электрического контакта между деталью и фрезой во время ее обработки. Для этого измерительный стенд изолируют от стола фрезерного станка, а к вращающейся фрезе подведен контакт токосъемника. Сигналы отклонения детали во времени (осциллограмма) и наличие контакта между деталью и инструментом синхронизированы и могут быть записаны после оцифровки.



- 1 – Массивное основание; 2 – Упругая система (УС) тонкостенной детали (тонкостенная пластина); 3 – Прижим; 4 – Концевая фреза;
 5 – Обрабатываемый образец; 6 – Датчик перемещения; 7 – Электроизолятор;
 8 – Стол фрезерного станка; Δ – Измерительный зазор

Рисунок 1 – Общая схема измерительного стенда для исследования колебаний тонкостенной детали и условий ее контактирования с инструментом при концевом фрезеровании

На рис. 2 представлений базовий фрагмент осциллограмми (БФО) коливання деталі між врезанням двох сусідніх зубів. БФО дозволяє повністю визначати умови збудження деталі, починаючи з моменту врезання зуба в точку A , її відхилення під дією сили різання і появи автоколебаний в період різання до точки B вихода зуба з зацеплення з срізаємим припуском. Від точки B до точки A' деталь виконує вільні затухаючі коливання, до моменту врезання наступного зуба в точку A' . Це час є часом холостого ходу - $\tau_{\text{о.о.}}$. Повне час між точками A і A' різання сусідніх зубів визначається як час одного циклу $\tau_{\text{цикла}}$, а осциллограма відхилення деталі за цей час і розглядається як БФО. Точку врезання зуба A і вихода з зацеплення B на БФО визначають за наявності електричного контакту між деталлю і інструментом.

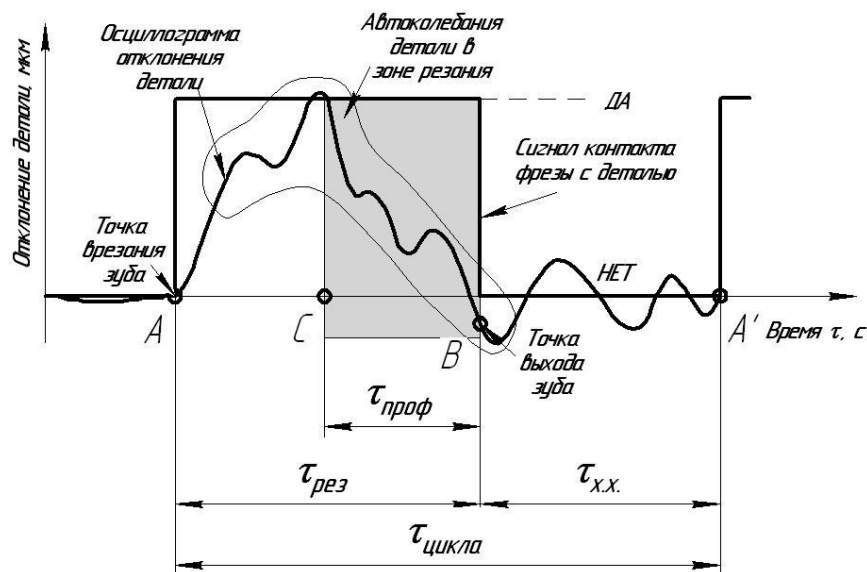


Рисунок 2 – Базовий фрагмент осциллограмми (БФО) відхилення тонкостінної деталі в час фрезерування і сигнал контакту фрези з поверхністю різання (фрезерування попутне)

Цілью дослідження є розробка методики оцінки рівня інтенсивності автоколебаний, що виникають в тонкостінній деталі при її кінцевому фрезеруванні. Умінь точно оцінювати величину інтенсивності виникаючих автоколебаний дозволяє проводити розробку різних технологічних прийомів подавлення цього виду вібрацій. Найбільше

ефективними технологічними прийомами подавлення автоколебаний являються:

- Увеличение жесткости путем применения специальных сред, окружающих тонкостенную деталь.
- Применение новых конструкций инструментов с переменной геометрией.
- Использование режимов фрезерования с модулированием скоростью главного движения и др.

Условия проведения исследований.

а). **Оборудование** – универсально фрезерный станок модели FWD-32J.

б). **Инструмент** – концевая 3-х зубая фреза CANELA D20 Z3 со сменными пластинами из твердого сплава APKT100305PDER JC8050 фирмы Dijet. В эксперименте устанавливался 1 режущий зуб. Вместо двух других зубьев устанавливали равные по весу свинцовые грузики, обеспечивающие балансировку фрезы. Геометрия режущего зуба: $\gamma=6^\circ$, $\alpha=11^\circ$, $\lambda=-10^\circ$. Вылет фрезы $\varnothing 20$ мм составлял $L_{фр}=36$ мм, жесткость фрезы $j_{фр}=17888$ Н/мм, частота собственных колебаний $f_{фр}=781$ Гц, декремент затухания $\delta_{фр}=0,72$.

в). **Образец из обрабатываемого материала** размером 50x20x2 (СтЗкп ГОСТ 380-2005).

г). **Упругая система тонкостенной детали (УС)**. Пластина с размерами вылета $L=80$ мм, $B=60$ мм, $h=4$ мм. Материал Сталь 65Г (HRC 60). Вместе с закрепленным обрабатываемым образцом УС детали имеет следующие характеристики: жесткость детали $j_{дет}=228$ Н/мм, частота собственных колебаний $f_{дет}=364$ Гц, декремент затухания $\delta_{дет}=0,091$.

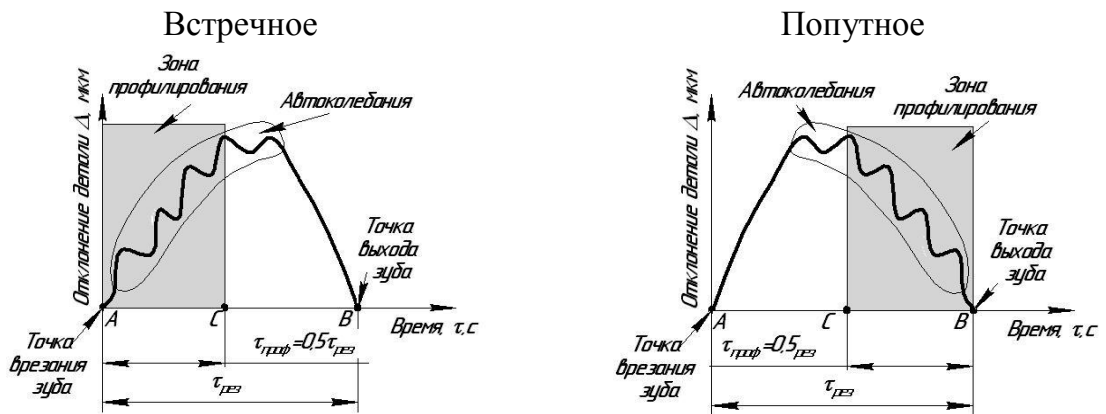
д). Режимы фрезерования:

- скорость вращения шпинделя от $n=224$ до 1800 об/мин;
- продольная подача стола от $S_{мин}=11,2$ до 90 мм/об;
- подача на зуб $S_z=0,05$ мм/зуб;
- осевая глубина $a_p=2$ мм;
- радиальная глубина $a_e=0,5$ мм;
- направление подачи – встречное и попутное;
- условие резания – свободное, косоугольное.

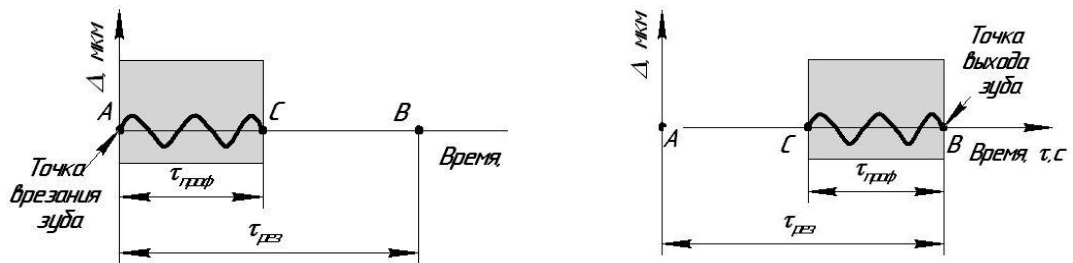
Разработка методики определения величины размаха автоколебаний – R_2

На рис. 3 показана последовательность определения величины размаха автоколебаний R_2 на основе анализа базовых фрагментов осциллограммы (БФО) колебаний тонкостенной детали в процессе ее фрезерования. Определение параметра R_2 состоит из 3-х этапов.

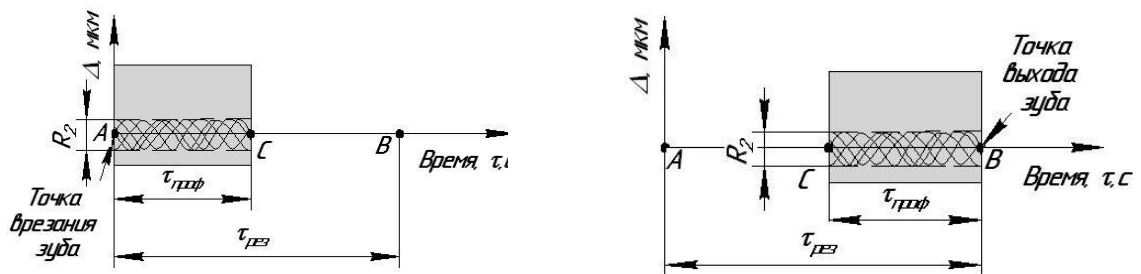
1 этап – Определение зоны профилирования



2 этап – Спрямление БФО в зоне профилирования



3 этап – Определение размаха автоколебаний R_2



$\tau_{рез}$ – время резания, с, $\tau_{проф}$ – время профилирования, с.

Рисунок 3 – Последовательность определения по БФО размаха автоколебаний в зоне профилирования – R_2

На 1 этапе – определяется время резания – $\tau_{рез}$ зубом фрезы, путем совмещения осциллограммы колебаний детали и наличия контакта зуба фрезы с деталью. Далее определяют время профилирования – $\tau_{проф}$, которое составляет половину от времени резания – $\tau_{рез}$. При встречном фрезеровании участок профилирования примыкает к точке А входа зуба фрезы в срезаемый припуск, а при попутном к точке В выхода зуба из зоны резания.

На 2 этапе – часть осциллограммы колебания детали, относящейся к зоне профилирования, спрямляют, применяя фильтр Савицкого-Голея [5].

На 3 этапе – после наложения колебаний в зоне профилирования от большого ($n \geq 100$) числа последовательных резов можно определить величину размаха автоколебаний детали – R_2 . Точка врезания зуба А является началом совмещения каждого реза при встречном фрезеровании, а точка В выхода зуба – началом совмещения при попутном фрезеровании.

Обсуждение результатов исследований.

На рис. 4 приведены кривые размаха автоколебаний R_2 в зоне профилирования от скорости вращения фрезы и направления подачи.

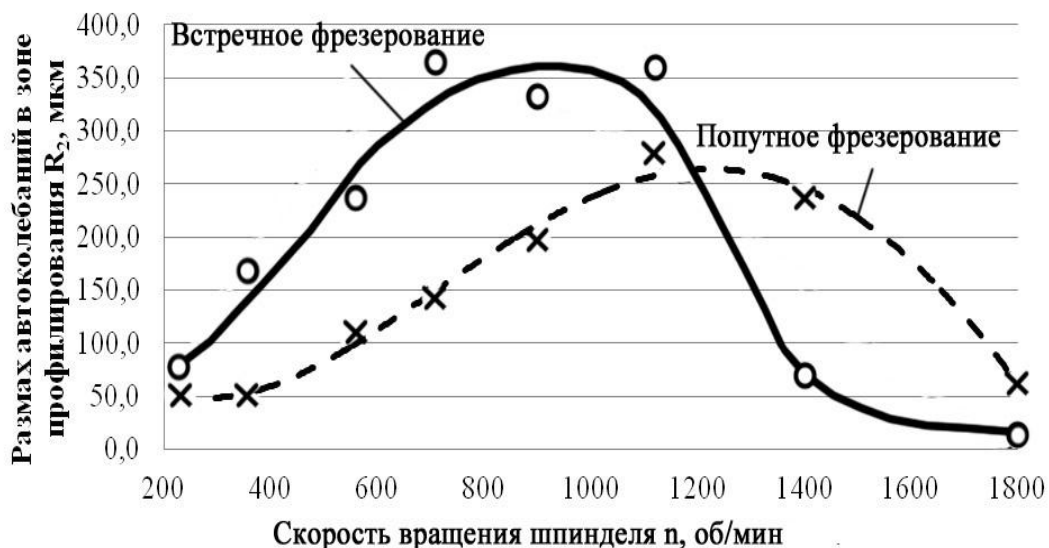


Рисунок 4 – Влияние направления фрезерования и скорости вращения шпинделя на размах автоколебаний детали в зоне профилирования – R_2

Можно видеть, что уровень автоколебаний при встречном фрезеровании значительно выше, чем при попутном, а скорость, при

которой автоколебания вырождаются при встречном фрезеровании ниже, чем для попутного. Различия в механизмах возбуждения и вырождения автоколебаний при изменении направления подачи требуют специальных исследований.

На рис. 5 показаны кривые оценки шероховатости обработанной поверхности по параметру R_a при изменении скорости вращения фрезы и направления подачи. Значения параметров R_2 и R_a измерены одновременно для каждого сочетания режимов фрезерования.

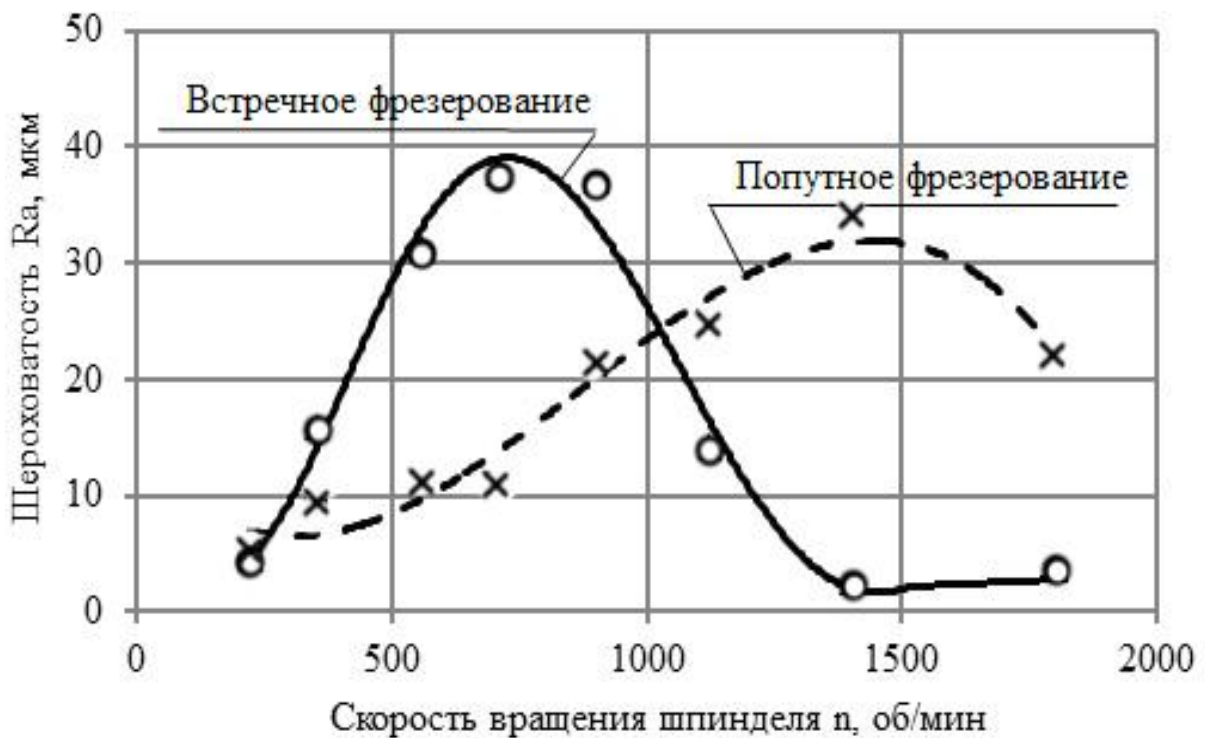


Рисунок 5 – Влияние направления фрезерования и скорости вращения шпинделя на шероховатость обработанной поверхности тонкостенной детали

Сравнение кривых, приведенных на рис. 4 и рис. 5, указывает на очевидную связь этих характеристик, тесноту которой легко определить корреляционным анализом. В табл. 1 приведены экспериментальные значения R_2 и R_a , представленные на рис. 4 и 5.

Таблица 1 – Экспериментальные значения величины размаха автоколебаний в зоне профилирования – R_2 и шероховатости обработанной поверхности – Ra при различных условиях фрезерования

№ эксперимента	Скорость вращения шпинделя n , об/мин	Встречное фрезерование		Попутное фрезерование	
		х	у	х	у
		Размах в зоне профилирования R_2 , мкм	Шероховатость Ra , мкм	Размах в зоне профилирования R_2 , мкм	Шероховатость Ra , мкм
	224	79,5	4,6	36,8	5,0
	355	173,4	16,0	57,2	9,4
	560	257,6	31,3	94,1	11,4
	710	398,6	37,7	129,3	10,8
	900	247,7	37,2	171,1	21,2
	1120	127,5	14,1	199,9	24,9
	1400	35,0	2,7	240,9	34,0
	1800	6,1	4,2	81,2	21,9

Результаты корреляционного анализа показали, что коэффициент парной корреляции для встречного фрезерования составляет $r = 0,94$, а для попутного $r = 0,87$.

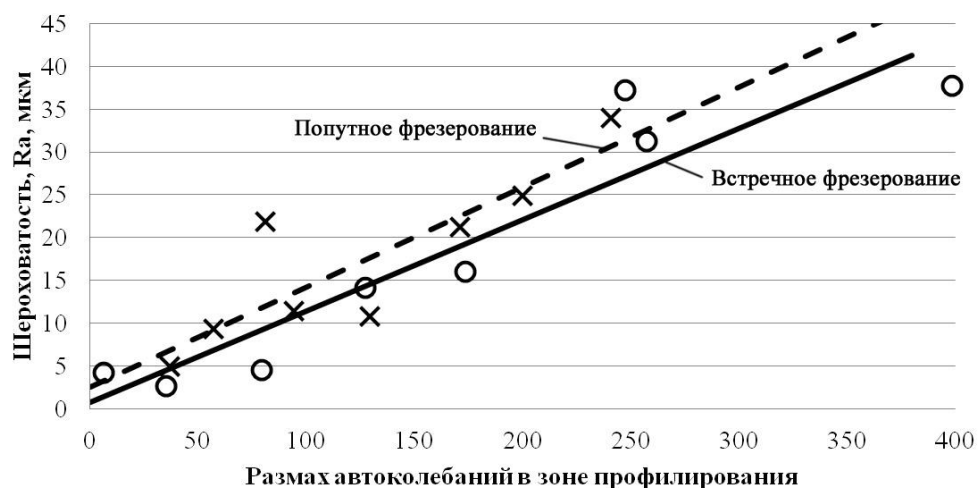


Рисунок 6 – Зависимость влияния размаха автоколебаний в зоне профилирования R_2 на шероховатость обработанной поверхности – Ra от направления подачи

Линии регрессии можно описать уравнением $Ra = 0,11R_2 + 0,83$ для встречного фрезерования и $Ra = 0,12R_2 + 2,56$ для попутного, которые расположены в статистически незначимой близости (рис. 6).

В связи с этим, повторный корреляционный анализ был проведен для всего массива данных, без разделения их по направлениям подачи. В этом случае коэффициент парной корреляции был равным $r = 0,91$, а уравнение линии регрессии $Ra = 0,11R_2 + 2,4$ (рис. 7).

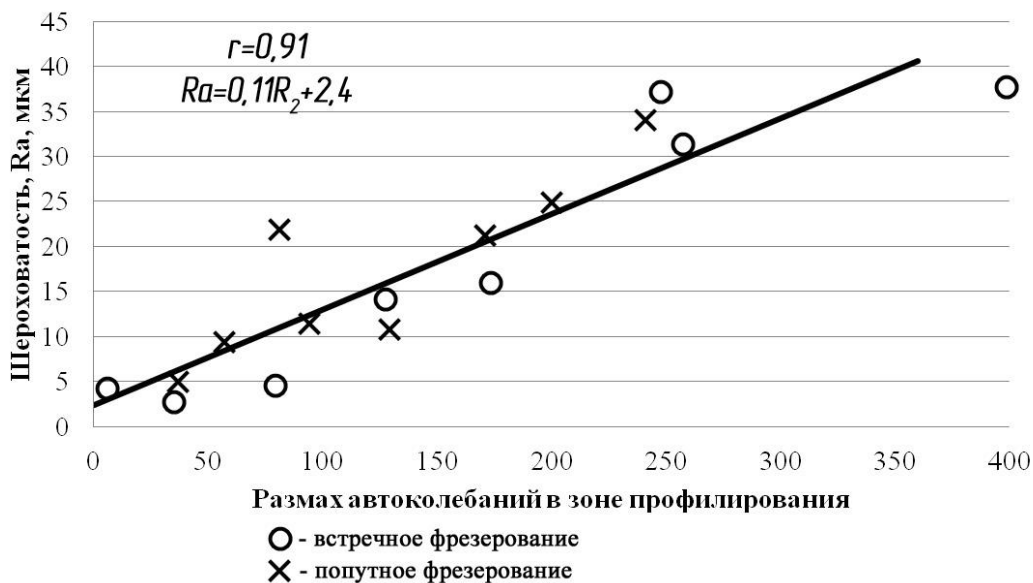


Рисунок 7 – Обобщенная зависимость влияния размаха автоколебаний в зоне профилирования R_2 на шероховатость обработанной поверхности – Ra

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что интенсивность автоколебаний в зоне профилирования – R_2 однозначно определяет уровень шероховатости обработанной поверхности, независимо от направления подачи. Эти результаты позволяют утверждать, что параметр R_2 является надежным критерием оценки интенсивности автоколебаний.

Выводы:

1. В статье описана методика определения интенсивности возбуждения автоколебаний – R_2 при концевом фрезеровании тонкостенной детали для различных направлений подачи.

2. Показано, что использование базового фрагмента осциллограммы (БФО) для оценки вибрационных явлений возникающих в тонкостенной детали является статистически надежным источником информации.

Список использованных источников: 1. *Логоминов В.А.* Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: дис. ... канд. техн. наук.: 05.03.01: защищена 21.02.2013: утв. 25.04.2013 / *Логоминов Виктор Алексеевич.* – Запорожье, 2013. – 226 с. 2. *Розенберг Ю. А.* Резание материалов : Учебник для техн. вузов. – Курган : Изд-во ОАО «Полиграфический комбинат» Зауралье: 2007. – 294 с.: ил. 3. Пат. UA 94974 МПК (2006) G01H11/00; G01M7/02, Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей, *Логоминов Віктор Олексійович, Гермашев Антон Ігорович, Дядя Сергій Іванович, Козлова Олена Борисівна* - u201405981; заявл 02.06.2014; опубл 10.12.2014. 4. *Внуков Ю. Н.* Стенд для исследования механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей концевыми фрезами. / *Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов, П.А. Каморкин* // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 79 – С. 32-37. 5. *Логоминов В. А.* Методика исследования регенеративных автоколебаний по Cut-граммам при фрезеровании тонкостенных деталей / *Логоминов В. А.* // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. *Логоминов В. А.* – Вып. 9. – Харків : НТУ «ХПИ» 2014. – С. 179-182.

Bibliography (transliterated): 1. *Logominov V.A.* Formirovanie sherohovatosti obrabotannoy poverhnosti pri kontsevom tsilindricheskom frezerovanii tonkostennyih elementov detaley: dis. ... kand. tehn. nauk.: 05.03.01: zaschischna 21.02.2013: utv. 25.04.2013 / *Logominov Viktor Alekseevich.* – Zaporozhe, 2013. – 226 p. 2. *Rozenberg Yu. A.* Rezanie materialov : Uchebnik dlya tehn. vuzov. – Kurgan : Izd-vo ОАО «Poligraficheskiy kombinat» Zaurale: 2007. – 294 p.: il. 3. Pat. UA 94974 MPK (2006) G01H11/00; G01M7/02, Stend dlya doslidzhennya kolivan pri kintsevomu tsilindrichnomu frezeruvanni tonkostinnih elementiv detaley, *Logominov Viktor Oleksiyovich, Germashev Anton Igorovich, Dyadya Sergiy Ivanovich, Kozlova Olena Borisivna* – u201405981; zayavl 02.06.2014; opubl 10.12.2014. p 4. *Vnukov Yu. N.* Stend dlya issledovaniya mehanicheskikh kolebaniy pri frezerovanii malozhestkih detaley kontsevyimi frezami. / *Yu. N. Vnukov, V. A. Logominov, P. A. Kamorkin* // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. – Harkov : NTU «HPI», 2011. – Vyip. 79 – P. 32–37. 5. *Logominov V. A.* Metodika issledovaniya regenerativnyih avtokolebaniy po Cut-grammam pri frezerovanii tonkostennyih detaley / *Logominov V. A.* // Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni : zb. nauk. prats. *Logominov V. A.* – Vyip. 9. – Harkiv : NTU «HPI» 2014. – P. 179–182.