

УДК 621.941

А.А. ОРГИЯН, д-р тех. наук.,
И.М. ТВОРИЩУК,
А.В. БАЛАНЮК, Одесса, Україна

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ПОДРЕЗКИ СПЛОШНЫХ И ПРЕРЫВИСТЫХ ТОРЦОВ

У статті вивчена віброустійчивість процесу тонкого точіння при підрізуванні торців з переривчастою і суцільною поверхнями. Розроблено методіку розрахунку граничної ширини зрізу різцем - лопатою при зміні жорсткості підсистеми деталь - пристосування, подачі, а також зміни матеріалу заготовок. Виконано зіставлення розрахункових і експериментальних результатів. Вивчено параметричну стійкість системи при підрізуванні переривчастих торців. Побудовано області параметричної стійкості, а також осцилограми коливань.

Ключові слова: віброустійчивість, процес тонкого точіння, стійкість системи

В статье изучена виброустойчивость процесса тонкого точения при подрезке торцов с прерывистой и сплошной поверхностями. Разработана методика расчета предельной ширины среза резцом - лопатой при изменении жесткости подсистемы деталь - приспособление, подачи, а также изменения материала заготовок. Выполнено сопоставление расчетных и экспериментальных результатов. Изучена параметрическая устойчивость системы при подрезке прерывистых торцов. Построены области параметрической устойчивости, а также осциллограммы колебаний.

Ключевые слова: виброустойчивость, процесс тонкого точения, устойчивость системы

The paper studied the process of fine turning vibration when facing intermittent and continuous surfaces. The method of calculating the width of the marginal cut-off cutter - a shovel when the rigidity changing part subsystem - device, feeding and changing pieces of material. The comparison of the calculated and experimental results. Studied the stability of parametric system for trimming broken ends. Constructed area of parametric stability and oscillation waveform.

Keywords: vibration, fine turning, stability of parametric system

Технологія совмещения операцій на отделочно-расточных станках (ОРС) передбачує два принципіально різних метода виконання операції подрезки торців: метод радіальної подачі і метод осевої подачі. Більш продуктивним і простим являється метод осевої подачі (подрезка широко лезвийним різцем-ножом), можливості якого ще вивчені недостатньо. В дослідженні змінювалися матеріали образців: (сталь, чугун, бронза і алюміній); діаметри подрезаних торців від 60 до 150 мм, а також їх ширина до 10 мм. Режим різання при обробці сталі $V = 50 \div 100$ м/мин; для чугуна $V = 80 - 200$ м/мин, при обробці бронзи $V = 120 \div 270$ м/мин. Подача змінювалася в межах $S = 0,02 - 0,03$ мм/об. Кількість прерываний за оборот: 2, 4, 10. Значення максимально допустимої ширини торця при різанні суттєво залежить від жорсткості

приспособления, в котором закреплена деталь (инструмент), а также от количества прерываний [1,2].

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Борштанга 2, несущая широкий подрезной резец 1, была установлена на шпиндельной головке 3. Обрабатываемая деталь 4, торец которой меньше ширины режущего лезвия, крепилась в приспособлении 5, расположенном на подвижном столе станка.

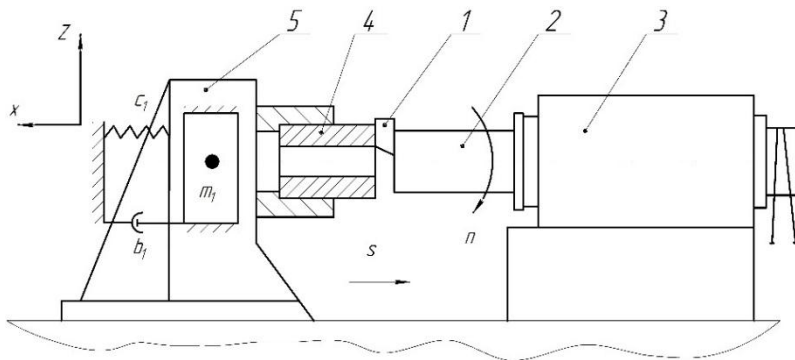


Рисунок 1 – Схема эксперимента

Колебания возникающие в процессе резания, ориентируются в основном по нормали к обрабатываемой поверхности и определяются координатой X , по которой действует сила резания P_x .

Колебания развиваются в 2-х подсистемах: I – "деталь-приспособление"; II – "шпиндель-борштанга". Частота собственных колебаний шпиндельного узла в направлении его оси приблизительно равна 350 - 400 Гц, а жесткость изменяется (в зависимости от типоразмера шпиндельной головки) в пределах 200 – 600 н/мм. В приведенных экспериментах жесткость приспособлений изменялась от 60 до 130 н/мм, а частота свободных колебаний составляла от 100 до 200 Гц. Затухание колебаний, характеризуемое логарифмическим декрементом, в обеих подсистемах составляло примерно 0,1.

Известно [3], что виброустойчивость зависит от параметров обеих подсистем, если близки их собственные частоты колебаний. При существенном различии частот виброустойчивость снижается, в основном, вследствие колебаний лишь той подсистемы, которая обладает более низкой собственной частотой и малой жесткостью. Сравнивая динамические параметры обеих подсистем, можно заключить, что в расчетной модели можно учитывать лишь колебания подсистемы "деталь - приспособление".

Следуя В. А. Кудинову [3] при проведении динамического расчета, направленного на определение виброустойчивости и нахождение

зависимостей между параметрами упругой системы и процесса резания, рассматриваем одноконтурную систему, состоящую из двух элементов: эквивалентной упругой системы и процесса резания.

Для разработки обоснованной расчетной схемы эквивалентной упругой системы следует изучить статические и динамические характеристики, а также формы колебаний при резании. В случае выполнения тонкого растачивания колебания в упругой системе ОРС при потере устойчивости обусловлены малой жесткостью подсистемы шпиндельный узел-борштанга и соответствуют изгибной форме колебаний. При проведении подрезки торцов, хотя жесткость борштанги имеет примерно те же значения, форма возникающих колебаний существенно изменяется. Величина и направление действия сил резания при подрезании торца иные, чем при растачивании: сила резания увеличивается, особенно сильно возрастает компонента P_x . Увеличиваются не только статические отжимы в системе, возрастают при тех же условиях и динамические перемещения. Возникновение колебаний в значительной мере определяется жесткостью подсистемы деталь – приспособление [4, 6].

Составляющие силы резания при подрезке свободного торца направлены: P_x – по оси вращения (направление подачи) и P_z – по касательной к окружности, лежащей в плоскости резания. В условиях действия таких сил могут возникать колебания упругих подсистем по координате x и крутильные колебания. В данной работе рассматриваем лишь колебания по координате x , которые определяют чистоту обработанной поверхности и выполнимость операции подрезки торцов.

Уравнения движения упругой системы имеет вид $m\ddot{x} + h\dot{x} + cx = P_x$.

Параметры, характеризующие эту систему должны соответствовать параметрам подсистемы деталь-приспособление при колебаниях по низшей форме в направлении оси X (m - приведенная масса подсистемы "деталь-приспособление", b - коэффициент демпфирования, C - жесткость системы "деталь-приспособление").

Процесс резания в расчетах виброустойчивости описываем динамической характеристикой, полученной В.А. Кудиновым [3]. Характеристика устанавливает связь между вибрационными перемещениями и соответствующими им изменениями силы резания. Динамическая характеристика отражает инерционные свойства процесса, проявляющиеся в фазовых сдвигах (отставании) силы P_z от перемещения.

Простейшая форма динамической характеристики в операторной форме записывается в виде:

$$P_z = \frac{K_p}{T_p \cdot p + 1} \cdot Y$$

где: K_p - коэффициент резания, равный $K_p = 1,5 \cdot \sigma_6 \cdot \xi_0 \cdot b$; σ_6 - временное сопротивление обрабатываемого материала; ξ_0 - усадка стружки; b - ширина среза; T_p - постоянная времени стружкообразования ($T_p = 1,5 \cdot \frac{a_0 \cdot \xi_0}{V}$); a_0 - толщина среза; V - скорость резания.

Замкнутая система описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} T_1^2 \cdot \ddot{x} + T_2 \cdot \dot{x} + x &= k \cdot P_x, \\ T_p \cdot \dot{P}_z + P_z &= -k_p \cdot x, \end{aligned} \quad (1)$$

где: $T_1^2 = \frac{m}{c}$; $T_2 = \frac{h}{c}$; $k = \frac{1}{c}$.

Учитывая, что приближенно $P_x = \mu \cdot P_z$, где μ - коэффициент трения стружки о переднюю грань, запишем систему в окончательном виде:

$$\begin{aligned} T_1^2 \cdot \ddot{x} + T_2 \cdot \dot{x} + x &= k \cdot \mu \cdot P_z, \\ T_p \cdot \dot{P}_z + P_z &= -k_p \cdot x. \end{aligned} \quad (2)$$

Рассмотрим условия устойчивости системы (2). Характеристическое уравнение системы имеет вид:

$$\begin{vmatrix} T_1^2 p^2 + pT_2 + 1 & -k\mu \\ k_p & T_p p + 1 \end{vmatrix} = 0.$$

Раскрывая определитель, получаем:

$$\left(T_1^2 \cdot p^2 + T_2 \cdot p + 1 \right) \left(T_p \cdot p + 1 \right) + k_p \cdot k \cdot \mu = 0. \quad (3)$$

Коэффициенты характеристического уравнения по убывающим степеням p равны:

$$p^3 \rightarrow a_0 = T_1^2 T_p;$$

$$p^2 \rightarrow a_1 = T_1^2 + T_2 T_p;$$

$$p^1 \rightarrow a_2 = T_2 + T_p;$$

$$p^0 \rightarrow a_3 = 1 + k_p k_\mu.$$

Система устойчива, если положительны коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_3 и определитель Гурвица, имеющий вид:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3.$$

Первое условие выполняется всегда. Второе условие ($\Delta > 0$) выполняется при определенных значениях параметров упругой системы и процесса резания. Для анализа устойчивости раскроем значение определителя Гурвица:

$$\Delta = T_1^2 T_2 + T_2^2 T_p + T_2 T_p^2 - T_1^2 T_p k_p k_\mu > 0.$$

Записывая это условие в параметрах процесса резания и переходя к предельному значению ширины среза b_{np} , находим

$$b_{np} = \frac{T_2 (T_1^2 + T_2 T_p + T_p^2)}{k_p T_1^2 T_p k_\mu}. \quad (4)$$

Полученное выражение позволяет расчетным путем определить для заданного приспособления размеры предельно допустимой ширины обрабатываемого торца. Однако, как указывалось выше, расчет основывается на целом ряде упрощающих допущений. Правомерность принятых допущений может быть проверена при сопоставлении результатов расчета с опытными данными. Примененная методика исследования предусматривает проведение такого рода сопоставления. Эксперимент и соответствующий расчет проводятся с использованием специального приспособления с изменяемыми параметрами.

В расчетах устойчивости приняты: обрабатываемый материал - сталь 45, $\sigma_g = 70 \text{ кГ} / \text{м}^2$, скорость резания $V = 100 \text{ м} / \text{мин} = 1,67 \cdot 10^3 \text{ мм} / \text{сек}$, подача $s = 0,02 \text{ мм} / \text{об}$ (толщина среза $a_0 = 0,02 \text{ мм}$), усадка стружки $\xi = 5$. Коэффициент трения стружки о резец $\mu = 0,8$.

Коэффициент резания равен:

$$k_p = 1,5 \cdot 70 \cdot 5 \cdot b \approx 525 \cdot b \text{ кГ} / \text{мм}^2.$$

Постоянная стружкообразования равна:

$$T_p = 1,5 \cdot \frac{0,02 \cdot 5}{1,67 \cdot 10^3} = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ сек}.$$

Результаты расчетов устойчивости при изменении жесткости приспособления приведены в табл.

Таблица 1 – Результаты расчетов предельной ширины торцов для разных податливостей системы "деталь - приспособление"

$k, \text{мм} / \text{кГ}$	$T_1^2, \text{сек}^2$	$T_2, \text{сек}^2$	$b_{np}, \text{мм}$
$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,633 \cdot 10^{-6}$	$0,43 \cdot 10^{-4}$	11,6
$0,12 \cdot 10^{-3}$	$0,323 \cdot 10^{-6}$	$0,344 \cdot 10^{-4}$	7,8
$0,19 \cdot 10^{-3}$	$0,157 \cdot 10^{-6}$	$0,266 \cdot 10^{-4}$	3,9
$0,24 \cdot 10^{-3}$	$0,125 \cdot 10^{-6}$	$0,258 \cdot 10^{-4}$	3,1
$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,115 \cdot 10^{-6}$	$0,27 \cdot 10^{-4}$	2,7
$0,34 \cdot 10^{-3}$	$0,110 \cdot 10^{-6}$	$0,264 \cdot 10^{-4}$	2,2
$0,40 \cdot 10^{-3}$	$0,115 \cdot 10^{-6}$	$0,292 \cdot 10^{-4}$	2,1
$0,47 \cdot 10^{-3}$	$0,137 \cdot 10^{-6}$	$0,33 \cdot 10^{-4}$	2,0
$0,54 \cdot 10^{-3}$	$0,175 \cdot 10^{-6}$	$0,36 \cdot 10^{-4}$	1,8

Характер зависимости предельной ширины среза b_{np} при изменении податливости и подачи иллюстрируется графиками (рис. 2).

Ряд важных для практической оценки виброустойчивости закономерностей обнаружен в экспериментах (рис. 3).

При подрезке торцов малого диаметра (около 15 мм) с приближением к границе устойчивости развиваются колебания с частотой, близкой к собственной частоте упругой системы f_1 , причем уровень эти колебаний в пределах одного оборота почти не изменяется, а следы вибраций равномерно распределяются по обработанной поверхности. При обработке в тех же условиях торцов диаметром 40 мм и более наблюдаются колебания переменного уровня. На соответствующих участках обработанного торца обнаруживаются и значительно более интенсивные следы вибраций. Кроме того, при обработке торцов большого диаметра развиваются низкочастотные колебания с частотой $f_{\text{вр}}$ вращения шпинделя, размах которых вблизи границы устойчивости не превышает 0,3 мкм.

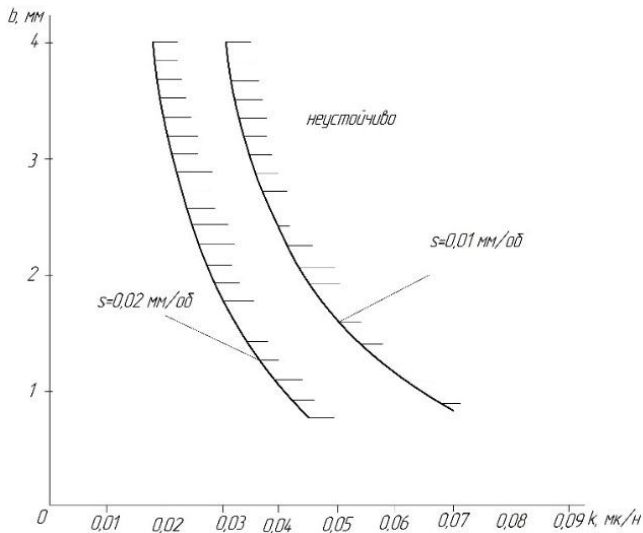


Рисунок 2 – Зависимости срезаемой ширины торца от податливости подсистемы и подачи

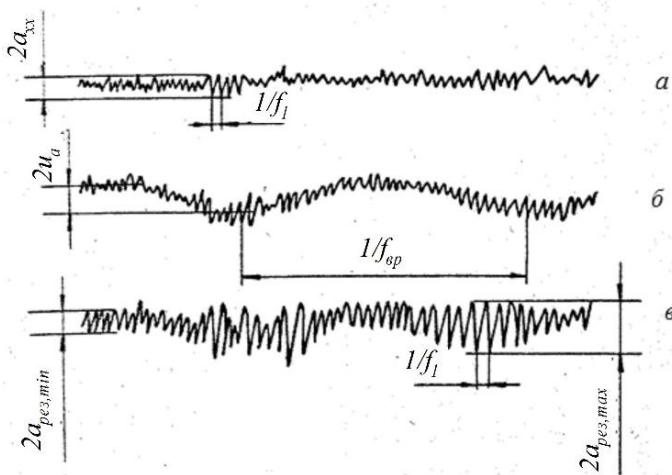


Рисунок 3 – Колебания модели приспособления при холостом ходе (а), при надежно устойчивом резании (б) и вблизи границы устойчивости (в)

При подрезке стальных образцов диаметром 40 мм на модели приспособления по значениям частоты вращения $f_1 = 13 \text{ Гц}$ и собственной частоте упругой системы $f_1 > 300 \text{ Гц}$ вычисляем безразмерную частоту параметрического возмущения $\nu = f_{\text{вп}} / f_1 < 0,05$. При таких значениях ν нельзя ожидать появления параметрической неустойчивости, так как параметрические резонансы высоких порядков не возбуждаются.

При подрезке прерывистых торцов периодически повторяются процессы врезания и выхода инструмента, нарушая стационарность динамической системы станка и вызывая появление интенсивных внешних воздействий на процесс резания. Период этих воздействий задается частотой входа и выхода режущих лезвий. Эти воздействия возбуждают колебания станка, уровень которых значительно больше, чем при обработке сплошных поверхностей в аналогичных условиях [5].

Система уравнений движения рассматривается, как система с одной степенью свободы, замкнутая на процесс резания:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + cx = \mu P_z \Phi(t),$$

$$T_p \dot{P}_z + P_z = \left[-K_p x - \beta \frac{dz}{dt} + K_p W \right] \Phi(t), \quad (5)$$

где β - определено экспериментально, как dP_z / dz в зависимости от скорости резания; W – приведенные значения толщины срезаемого слоя;

$\Phi(t)$ - функция времени, периода $T_g = (a_n + a_g) / V$, описывающая чередование замкнутых ($\Phi(t) = 1$) и незамкнутых ($\Phi(t) = 0$) состояний динамической системы. Эта функция определяется соотношениями

$$\Phi(t) = \begin{cases} 0 & n p u \quad i T_g < t < (i + g) T_g \\ 1 & n p u \quad (i + g) T_g < t < (i + 1) T_g \end{cases} \quad (6)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots$$

При записи уравнений учтено влияние «падающей» характеристики силы резания. Коэффициент β определен экспериментально как dP_z / dz в зависимости от скорости резания. Закономерности изменения уровня колебаний показывают, что при обработки прерывистых поверхностей источниками колебаний являются внешние воздействия на процесс резания ($K_p W \Phi(t)$) и параметрические возмущения, причем последние являются существенными лишь при малых значениях P_0 / ω (P_0 - круговая собственная частота системы с учетом демпфирования, ω - частота вращения).

Условие параметрической устойчивости получим для однородного уравнения

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + [c + \mu K_p \Phi(t)]y = 0. \quad (7)$$

Выполнив подстановку Эйлера

$$x = U \cdot e^{-ht/2m} \quad (8)$$

получим для функции U(t) уравнение Хилла с кусочно - постоянным параметрическим возмущением

$$\ddot{U} + P_{\partial}^2 [1 + 2\nu\Phi_1(t)]U = 0, \quad (9)$$

где

$$P_{\partial}^2 = c/m + \mu K_p / 2m + h^2 / 4m^2;$$

$$2\nu = \mu K_p / 2(c + \mu K_p),$$

P_{∂}^2 - круговая собственная частота с учетом демпфирования

$$\Phi_1(t) = 1 - 2\Phi(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } iT_{\theta} < t < (i+g)T_{\theta} \\ -1 & \text{при } (i+g)T_{\theta} < t < (i+1)T_{\theta} \end{cases}$$

Обозначая функцию U индексами, соответствующими Φ_1 , запишем условия сшивания и периодичности решений

$$\begin{aligned} U_1(gT_{\theta}) &= U_{-1}(gT_{\theta}), & U_{-1}(T_{\theta}) &= SU_1(0), \\ \dot{U}_1(gT_{\theta}) &= \dot{U}_{-1}(gT_{\theta}), & U_{-1}(T_{\theta}) &= S\dot{U}_1(0) \end{aligned} \quad (10)$$

Величина S, описывающая изменения решений уравнения (9) удовлетворяет уравнению

$$S^2 + 2SN + 1 = 0,$$

где

$$N = \frac{\cos(g \cdot P_{\partial} \cdot T_{\theta} \sqrt{1+2\nu}) \cdot \cos[(1-g) \cdot P_{\partial} \cdot T_{\theta} \sqrt{1-2\nu}] - \sin(g \cdot P_{\partial} \cdot T_{\theta} \sqrt{1+2\nu}) \cdot \sin[(1-g) \cdot P_{\partial} \cdot T_{\theta} \sqrt{1-2\nu}]}{\sqrt{1-4\nu^2}}. \quad (11)$$

Параметр $N=|1|$ определяет границу устойчивых решений, а при $|N| > 1$ решения будут нарастать и система потеряет параметрическую устойчивость. На рисунке 4 приведены зоны устойчивых и неустойчивых решений для разных коэффициентов параметрического возбуждения 2ν и $g=0,5$ и $0,1$. Зная параметры замкнутой динамической системы, отношение частот p_0/ω , а также параметрический коэффициент возбуждения 2ν , определяем положение рабочей точки на диаграмме параметрической устойчивости (рис. 4). Таким образом, уже на стадии проектирования технологического процесса можно назначить параметры технологической системы и режима резания.

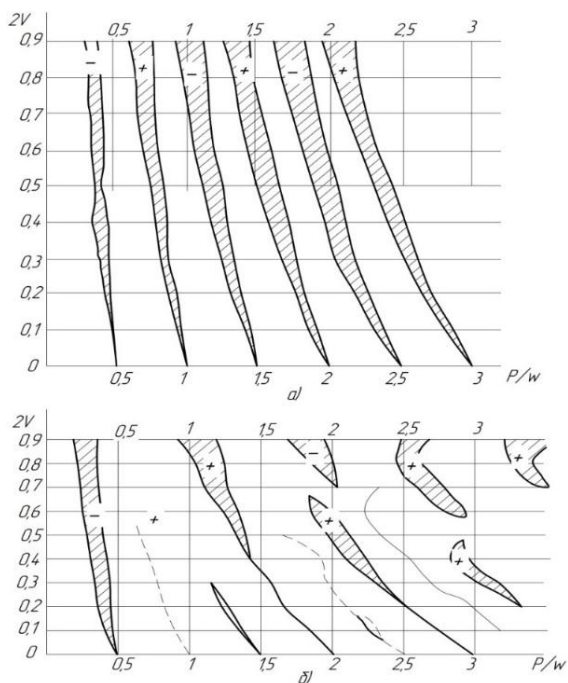
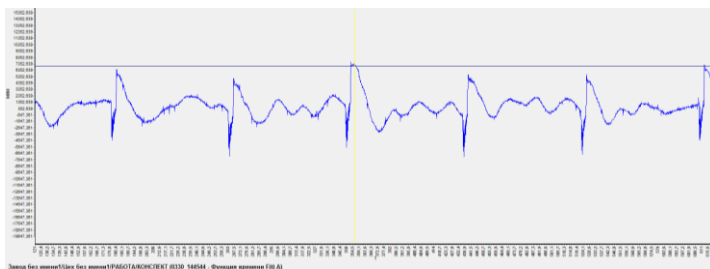
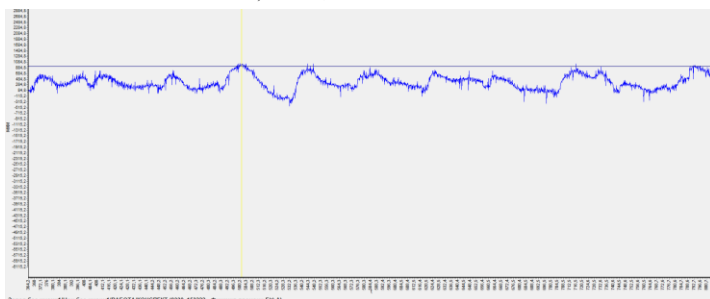


Рисунок 4 – Области параметрической устойчивости при подрезке прерывистых торцов (заштрихованы области неустойчивости), а) - $g = 0,1$; б) - $g = 0,5$.

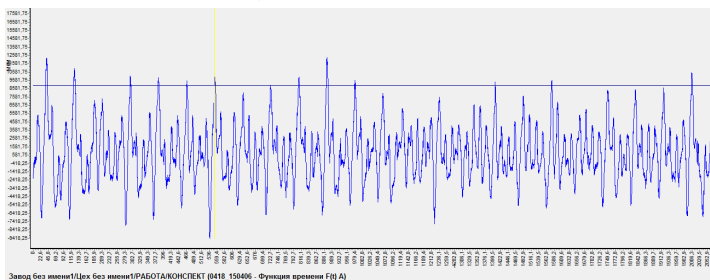
На рис. 5 приведены типичные осциллограммы колебаний при подрезке прерывистых торцов. Четко видны увеличения амплитуд колебаний при приближении к параметрическому резонансу, а также возмущающие гармоники.



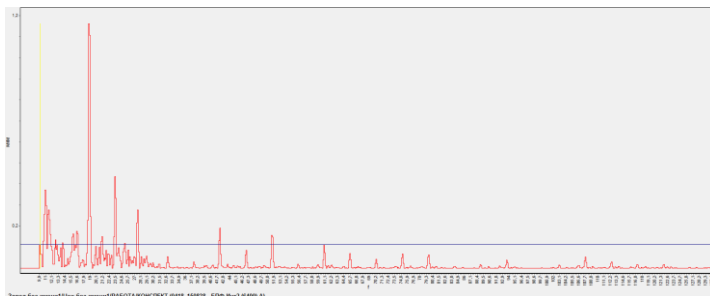
а) 1 паз, $n = 300$ об / мин



б) 2 паз, $n = 300$ об / мин



в) 4 паз, $n = 300$ об / мин



г) спектральный анализ 4 паз, $n = 300$ об / мин

Рисунок 5 – Осциллограммы колебаний при прерывистом резании

Выводы

1. Выполнены эксперименты по подрезке прерывистых торцов для изучения динамических процессов, определяющих качество обрабатываемой поверхности и ширину срезаемого торца.
2. Разработана методика и выполнены расчеты виброустойчивости ОРС при подрезке гладких и прерывистых торцов.
3. Выполнены расчеты параметрической устойчивости технологической системы при прерывистом резании.
4. Приведены осциллограммы экспериментальных исследований.
5. Изучены технологические особенности процесса тонкого точения при подрезке торцов.

Список использованных источников: 1. *В.М. Кобелев. Определение виброустойчивости и жесткости станка при совмещении подрезки с растачиванием. В.М. Кобелев, И.М. Творищук., Анд. А. Оргиян. Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. Вип. 10. Харків: "ХІП", 2015. – с. 47-54.* 2. *Вергилие И.С., Гольдрайс Г.М. Подрезка широких торцов на алмазно-расточных станках. – Технология и организация производства. 1967, №3, с. 25-28.* 3. *Кудинов В.А. Динамика станков. М., "Машиностроение", 1967, 359 с.* 4. *Ю.Ф. Копелев, В.М. Кобелев, О.И. Рябцев. Условия устойчивости процесса подрезки терцев деталей широким резцом. Республ. межведом. науч.-техн. сб. "Технология и автоматизация машиностроения", вып. 10. Изд. "Техніка", Киев, 1975.* 5. *Исследование виброустойчивости отделочно-расточных станков при подрезке торцов. Творищук И.М., Оргиян А.А., Мачей Р.А., Матеріали МНТК "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта", 2016.* 6. *Линчевский П.А., Джугурян Т.П., Оргиян А.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках. – Киев: Техника, 2001. – 300 с.*

Bibliography (transliterated): 1. *V.M. Kobelev. Opredelenie vibroustojchivosti i zhestkosti stanka pri sovmeshhenii podrezki s rastachivaniem. V.M. Kobelev, I.M. Tvorishhuk., And. A. Orgijan. Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: Zb. nauk. prac'. Vip. 10. Harkiv: "HPI", 2015. – s. 47-54.* 2. *Vergilie I.S., Gol'drais G.M. Podrezka shirokih torcov naalmazno-rastocnyh stankah. – Tehnologija i organizacija proizvodstva. 1967, №3, s. 25-28.* 3. *Kudinov V.A. Dinamika stankov. M., "Mashinostroenie", 1967, 359 s.* 4. *Ju.F. Kopelev, V.M. Kobelev, O.I. Rjabcev. Uslovija ustojchivosti processa podrezki tercev detalej širokim rezcom. Respubl. mezhvedom. n. – t. sb. "Tehnologija i avtomatizacija mashinostroenija", vyp. 10. Izd. "Tehnika", Kiev, 1975.* 5. *Issledovanie vibroustojchivosti odelochno-rastocnyh stankov pri podrezke torcov. Tvorishhuk I.M., Orgijan A.A., Macej R.A., Materialy MNTK "Progresivna tehnika, tehnologija ta inzhenerna osvita", 2016.* 6. *Linchevskij P.A., Dzhugurjan T.P., Orgijan A.A. Obrabotka detalej na odelochno-rastocnyh stankah. – Kiev: Tehnika, 2001. – 300 s.*