

УДК 621.941

**В.М. КОБЕЛЕВ**, канд. техн. наук, **И.М. ТВОРИЩУК**,  
**АНД. А. ОРГИЯН**, Одесса, Украина

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ И ЖЕСТКОСТИ СТАНКА ПРИ СОВМЕЩЕНИИ ПОДРЕЗКИ С РАСТАЧИВАНИЕМ**

У статті вивчено вібростійкість процесу тонкого розточування, поєднаного з підрізуванням торців. Розроблена розрахункова модель, що описує вигинисті коливання інструменту й осьові коливання пристосування з заготовлею, а також процес різання на основі його динамічної характеристики. Отримані відповідні результати розрахунків та експериментів для визначення жорсткості пристосування, необхідної для підрізування торця заданої ширини.

В статье изучена виброустойчивость процесса тонкого растачивания, совмещенного с подрезкой торцов. Разработана расчетная модель, описывающая изгибные колебания инструмента и осевые колебания приспособления с заготовкой, а также процесс резания на основе его динамической характеристики. Получены соответствующие результаты расчетов и экспериментов для определения жесткости приспособления, необходимой для подрезки торца заданной ширины.

The article explored the vibration process of fine boring combined with trimming ends. The design model is developed that describes the bending vibrations of the instrument and the axial oscillation device with the workpiece as well as cutting process based on its dynamic characteristics. Received the appropriate calculations and experiments to determine the stringency of device needed to trim the width specified Endcap.

На специальных отделочно-расточных станках (ОРС), кроме операции тонкого растачивания выполняется целый ряд других операций: наружное точение, подрезание торцов, фрезерование и др. Высокое качество обрабатываемых поверхностей является основным требованием выполнения этих операций.

Метод радиальной подачи резца часто используется при тонкой подрезке торцов. Такой метод обеспечивает получение точного торца с

высокой чистотой поверхности, хотя производительность такого метода обработки сравнительно невысока. Достаточно сложной представляется также задача разработки и изготовления резцовой головки, которая может обеспечить радиальную подачу резца: наличие механизма радиальной подачи затрудняет изготовление компактной и хорошо сбалансированной головки.

Метод осевой подачи с использованием широколезвийного резца-ножа является более простым и производительным [1]. Исследования по определению условий виброустойчивости при подрезке свободных торцов широколезвийным резцом были основаны на представлении эквивалентной упругой системы моделью с одной степенью свободы, соответствующей колебаниям приспособления в направлении подачи [2].

В практике проектирования ОРС часто встречаются детали, когда подрезаемый торец не свободен и операция подрезки совмещается с операцией растачивания. Обе названные операции выполняются одним и тем же резцом, при этом вершинная часть растачивает боковую цилиндрическую поверхность отверстия, а главная режущая кромка резца, выполненного в виде прямоугольного широкого ножа, обрабатывает внутренний торец (рис. 1). Следует отметить, что динамика процесса тонкого растачивания изучена достаточно подробно, и виброустойчивость ТС при обработке одной лишь боковой поверхности рассчитывается известными методами.

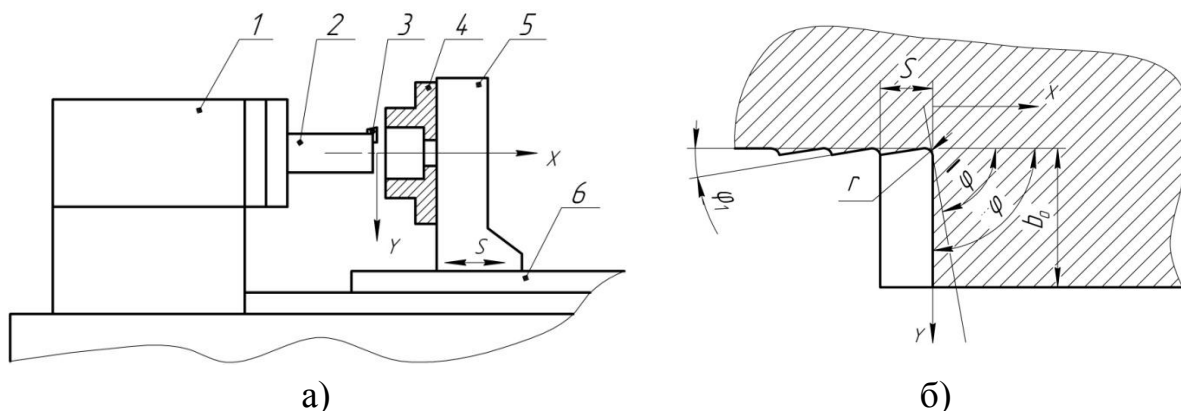


Рисунок 1 – Схема эксперимента (а) и углы резца в зоне резания (б):  
1-шпиндельная головка, 2-борштанга, 3-резец, 4-образец,  
5-стойка, 6-стол станка

Совмещение операций растачивания и подрезки торца приводит к необходимости учета связанных колебаний в двух направлениях: радиальном (ось  $y$ ) и осевом (ось  $x$ ) (рис. 1) Параметры подсистем, описывающие колебания по этим направлениям, определяются приведенными к зоне резания жесткостями ( $C_y$  и  $C_x$ ), массами ( $m_y$  и  $m_x$ ) и характеристиками затухания ( $b_y$  и  $b_x$ ) при колебаниях на основных частотах ( $f_y$  и  $f_x$ ). Предполагается, что связь между колебаниями борштанги и приспособления осуществляется лишь через процесс резания. Для описания процесса резания принимаем динамическую характеристику, полученную В.А. Кудиновым [2]. Характеристика отражает отставание изменений силы резания  $P_z$  от изменений толщины среза  $a$  и записывается в виде дифференциального уравнения

$$T_p \dot{P}_z + P_z = -k_p a, \quad (1)$$

где  $T_p$  - постоянная времени стружкообразования,

$T_p = 1,5 \frac{a_o \xi}{V}$ , выражаемая через толщину среза  $a_o$ , продольную усадку стружки  $\xi$  и скорость резания  $V$ ;

$k_p = 1,5 \sigma_b \xi b_o$  - коэффициент резания, выражаемый через временное сопротивление  $\sigma_b$ , усадку  $\xi$  и ширину среза  $b_o$ .

Изменение толщины среза  $a$  происходит при колебаниях в зоне резания по осям  $Y$  и  $X$  и может быть представлено в виде суммы частных перемещений, измеряемых в направлении схода стружки, нормальном к стороне угла  $\bar{\varphi}$  - эффективного угла в плане. При резании свободного торца углы  $\varphi$  и  $\bar{\varphi}$  равны. При несвободном резании угол  $\varphi$  больше, чем  $\bar{\varphi}$ . Изменение толщины среза

$$a = y \cos \bar{\varphi} + x \sin \bar{\varphi}. \quad (2)$$

Уравнения движения для двух подсистем: шпиндель – борштанга и деталь – приспособление имеют вид

$$\begin{aligned} m_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + C_y y &= P_y \\ m_x \ddot{x} + b_x \dot{x} + C_x x &= P_x. \end{aligned} \quad (3)$$

При малых углах  $\gamma$  можно считать, что

$$\begin{aligned} P_{xy} &= \mu P_z \\ P_x &= P_{xy} \sin \bar{\varphi} \\ P_y &= P_{xy} \cos \bar{\varphi}. \end{aligned}$$

Подставляя эти выражения в уравнения (3), а (2) в динамическую характеристику (1), получаем уравнения движения замкнутой системы

$$\begin{aligned} m_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + C_y y &= P_z \mu \cos \bar{\varphi} \\ m_x \ddot{x} + b_x \dot{x} + C_x x &= P_z \mu \sin \bar{\varphi} \\ T_p \dot{P}_z + P_z &= -k_p (y \cos \bar{\varphi} + x \sin \bar{\varphi}). \end{aligned} \quad (4)$$

Основной особенностью рассматриваемого процесса является малое отличие угла  $\bar{\varphi}$  от  $\frac{\pi}{2}$ . Обозначим малый угол  $\frac{\pi}{2} - \bar{\varphi} = \psi$ . Тогда выражения для функций от аргумента  $\bar{\varphi}$  принимают вид:

$$\begin{aligned} \sin \bar{\varphi} &\approx 1 - \frac{\psi^2}{2} \\ \cos \bar{\varphi} &\approx \psi. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что уравнения движения (4) могут быть представлены в форме

$$\begin{aligned} m_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + C_y y &= P_z \mu \psi \\ m_x \ddot{x} + b_x \dot{x} + C_x x &= P_z \mu \left(1 - \frac{\psi^2}{2}\right) \\ T_p \dot{P}_z + P_z &= -k_p \left[ y \psi + x \left(1 - \frac{\psi^2}{2}\right) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Составим характеристическое уравнение для системы (5), пренебрегая слагаемыми с  $\psi^4$

$$\begin{aligned} (m_y p^2 + b_y p + C_y)(m_x p^2 + b_x p + C_x)(T_p p + 1) + \\ + \mu k_p \psi^2 (m_x p^2 + b_x p + C_x) + \mu k_p (1 - \psi^2)(m_y p^2 + b_y p + C_y) = 0. \end{aligned}$$

Так как все коэффициенты этого уравнения положительны, устойчивость замкнутой динамической системы определяется двумя условиями:

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= (a_1 a_2 - a_0 a_3) > 0 \\ \Delta_4 &= \Delta_2 (a_3 a_4 - a_2 a_5) - (a_1 a_4 - a_0 a_5)^2 > 0, \end{aligned}$$

где:

$$a_0 = m_y m_x T_p$$

$$a_1 = m_y m_x + T_p (m_y b_x + m_x b_y)$$

$$a_2 = T_p (m_y C_x + m_x C_y + b_x b_y) + m_y b_x + m_x b_y$$

$$a_3 = T_p (b_y C_x + b_x C_y) + m_y C_x + m_x C_y + b_y b_x + \mu k_p \psi^2 m_x + \mu k_p (1 - \psi^2) m_y$$

$$a_4 = T_p C_y C_x + (b_y C_x + b_x C_y) + \mu k_p \psi^2 b_x + \mu k_p (1 - \psi^2) b_y$$

$$a_5 = C_y C_x + \mu k_p \psi^2 C_x + \mu k_p (1 - \psi^2) C_y$$

Для расчета  $\Delta_2$  и  $\Delta_4$  составлена программа реализуемая в среде MatLab.

Расчетная схема замкнутой динамической системы при совмещении операций подрезки и растачивания, описанная выше, отражает основную особенность системы – малое отличие угла  $\bar{\varphi}$  от  $\frac{\pi}{2}$ . Поэтому отношение  $P_x/P_z$  оказывается большим и колебания в системе развиваются, в основном по форме изгиба приспособления.

Основной задачей эксперимента является определение характеристик жесткости и колебаний системы в направлении  $X$ . Для выполнения расчетной проверки условий устойчивости системы были определены также и параметры подсистемы шпindelь-борштанга, деформации которой вызывают перемещения в направлении  $Y$ .

С целью определения суммарной технологической жесткости в направлении подачи и выявления роли приспособления в общем балансе жесткости измерялись: 1) относительные перемещения фланца шпинделя и приспособления на высоте 340 мм от зеркала стола (рис. 2а) и 2) перемещения приспособления относительно стола на высотах 180 мм и 340 мм от зеркала стола (рис. 2б). Нагружение осуществлялось с помощью домкрата через динамометр сжатия в распор между фланцем и приспособлением.

Усилие увеличивалось ступенчато от 50 кг до 150 кг. Перемещения измерялись микрокатором с ценой деления 0,2 мкм. Микрокатор крепился на жесткой базе.

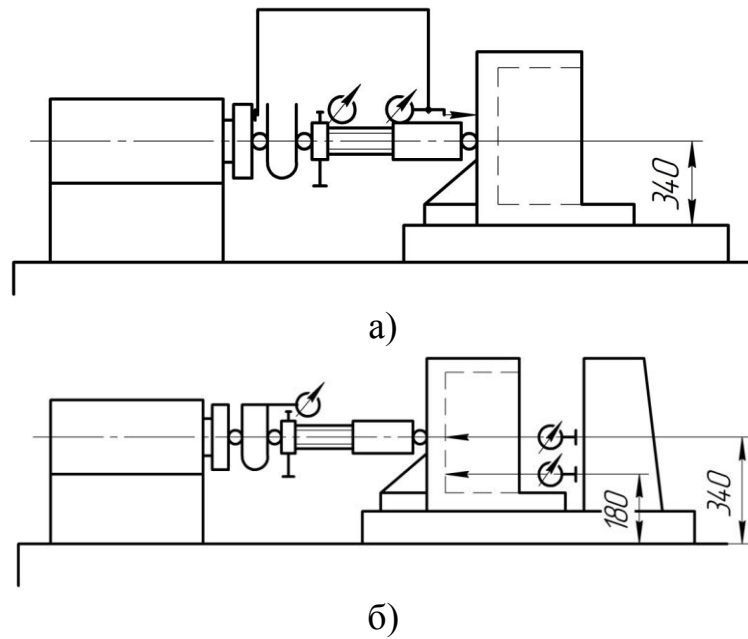


Рисунок 2 – Измерение статической жесткости а) фланца шпинделя и приспособления и б) приспособления относительно стола

Выполнены расчеты виброустойчивости при изменении податливости приспособления при подрезке торцов заготовок из стали и чугуна. Определены рациональные значения податливостей приспособлений для получения оптимальных значений ширины торца при устойчивом резании. Некоторые результаты экспериментов и расчетов представлены на рис. 3.

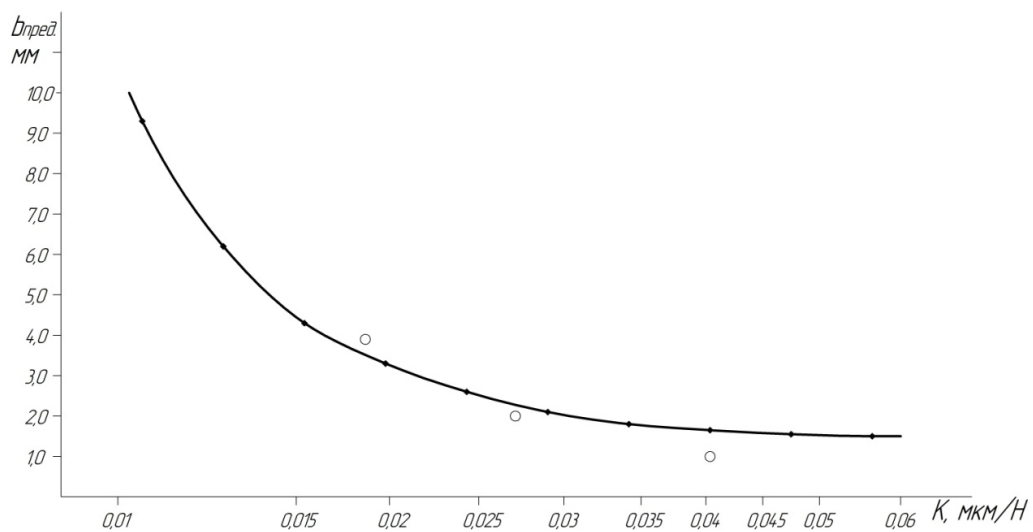


Рисунок 3 – Зависимость предельной ширины среза от податливости приспособления: ● -расчет; ○ -эксперимент

## Выводы

1. Получены величины минимально допустимых жесткостей приспособления при обработке деталей из стали и чугуна в зависимости от ширины свободного торца. Например, приспособление с осевой жесткостью 120 *H/мм* оказывается пригодным для торца не более 6мм без выхаживания и до 2 мм с выхаживанием.
2. Подрезку торцов следует проводить на специальных приспособлениях с жесткостью не меньше 200 *H/мм*.
3. В случае, когда операция подрезки включает длительное выхаживание, минимально допустимую жесткость необходимо увеличить в 2 раза.

**Список использованных источников:** 1.Вергилие И.С., Гольдраих Г.М. Подрезка широких торцов на алмазно-расточных станках. – Технология и организация производства, 1967, N3, с.25-28. 2. Кудинов В.А. Динамика станков. М., «Машиностроение», 1967, 359с.

**Bibliography (transliterated):** 1.Vergilie I.S., Gol'draih G.M. Podrezka shirokih torcov naalmazno-rastochnyh stankah. – Tehnologija i organizacija proizvodstva, 1967, N3, s.25-28. 2. Kudinov V.A. Dinamika stankov. M., «Mashinostroenie», 1967, 359s.