

УДК. 621.9.06

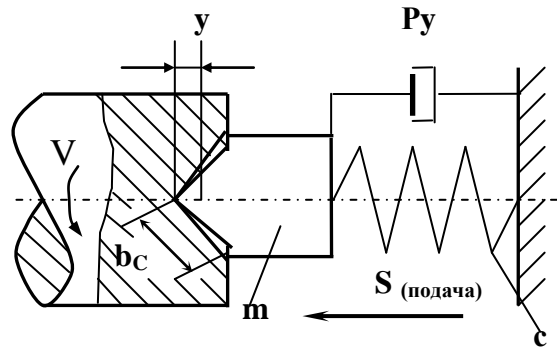
© Кондратюк О. Л.

## **УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ОПЕРАЦИИ ГЛУБОКОГО СВЕРЛЕНИЯ НА МАЛЫХ АГРЕГАТНЫХ СТАНКАХ**

При реализации процесса глубокого сверления на малых агрегатных станках отношение длины обрабатываемого отверстия к диаметру сверления ( $l/d$ ) доходит до величины  $20d$ , что вызывает в упругой системе СПИД появление автоколебаний инструмента и потери устойчивости процесса резания. Существует связь между перемещениями инструмента по нормали и касательной к поверхности резания, если изменение силы резания не запаздывает относительно изменения толщины срезаемого слоя. В том случае, когда имеется такое запаздывание, возможны автоколебания в упругой системе даже с одной степенью свободы, если инструмент перемещается по нормали к поверхности резания. Поэтому при глубоком сверлении и рассверливании отверстий автоколебания инструмента можно объяснить возможностью перемещения инструмента по нормали к поверхности резания (обусловлено продольной жесткостью и связано с осевыми колебаниями сверла) и запаздыванием изменения силы резания относительно изменения толщины срезаемого слоя металла.

Для большинства типов сверл между перемещениями инструмента по нормали (осевыми колебаниями) и касательной (крутильными колебаниями) к поверхности резания характерна непосредственная связь. Спиральные сверла, относящиеся к классу естественно закрученных стержней, получают продольные деформации от действия не только осевой силы, но и крутящего момента. Большой интерес представляет момент начала врезания инструмента, когда неустойчивость процесса резания обуславливается действием значительной осевой силы на поперечную кромку сверла при

большой осевой деформации. Для этого случая расчетную схему можно упростить. Допустим, что упругая система содержит лишь одну степень свободы, режущая кромка сверла перемещается по нормали к поверхности резания – возникают осевые колебания сверла (Рис.1).



**Рис.1** - Расчетная схема упругой системы.

Качество поверхности детали и ее размерная точность при глубоком сверлении улучшаются при отсутствии автоколебания упругой системы станка в процессе резания. При исследованиях устойчивости упругой эквивалентной системы станка можно определить такие сочетания параметров процесса резания – скорости резания  $V$ , ширины срезаемого слоя  $b_c$ , (пропорциональной глубине резания) при фиксированной толщине срезаемого слоя  $a_0$  (пропорциональной подаче), - при которых в упругой системе станка предупреждается возникновение автоколебаний. Это позволит правильно назначать режимы резания при глубоком сверлении отверстий в деталях из различных материалов.

Осевые колебания инструмента (Рис.1) в процессе резания описываются системой уравнений упругой эквивалентной системы станка и процесса резания (составлено на основании динамических характеристики резания, разработанной в [2]).

$$\left\{ \begin{array}{l} m_y \frac{d^2 y}{dt^2} + n_y \frac{dy}{dt} + c_y y = P_y; \\ T_p \frac{dP_y}{dt} + P_y = -k_p y, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_p \frac{dP_y}{dt} + P_y = -k_p y, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $y$  – осевое перемещение инструмента;  $P_y$  – отклонение от установившегося (статистического) значения составляющей силы резания, направленной по оси инструмента;  $T_p$  – постоянная времени процесса резания;

$$T_p \approx \frac{a_0 \xi}{v}; \quad (3)$$

$a_0$  – толщина срезаемого слоя;  $\xi$  – усадка стружки;  $v$  – скорость резания.

$$k_p = knb_c; \quad (4)$$

где  $k$  – удельная сила резания (осевая составляющая силы резания, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения срезаемого слоя);

$n$  – число режущих лезвий инструмента;  $b_c$  – ширина срезаемого слоя.

Удельная сила резания определяется экспериментально при установившемся режиме обработки (отсутствии автоколебаний) по формуле:

$$k = \frac{P_{y_0}}{nb_c a_0}, \quad (5)$$

где  $P_{y_0}$  – установившееся значение составляющей силы резания, направленной по оси инструмента.

Для исследования устойчивости упругой системы станка в процессе резания удобно пользоваться методом передаточных функций упругой системы станка и процесса резания  $W_y(s)$ ,  $W_p(s)$  [1].

На основании уравнений (1) и (2) записываем:

$$W_y(s) = \frac{1}{m_y s^2 + n_y s + c_y}; \quad (6)$$

$$W_p(s) = \frac{k_p}{T_p s + 1}, \quad (7)$$

где  $s$  – переменная интеграла Лапласа [1]. С учетом структурной системы станка в процессе резания

$$W(s) = \frac{W_y(s)}{1 + W_y(s) + W_p(s)}. \quad (8)$$

После подстановки значений  $W_y(s)$ ,  $W_p(s)$  в выражение (8) получим:

$$W(s) = \frac{W_p s + 1}{(m_y s^2 + n_y s + c_y) \cdot (T_p s + 1) + k_p}. \quad (9)$$

Известно, что динамическая система будет устойчива, если полюсы (корни знаменателя) её передаточной функции будут находиться в левой комплексной полуплоскости  $s$ , в которой действительная часть  $s$  отрицательна [1]. В связи с этим необходимо проанализировать корни полинома:

$$(n_y s^2 + n_y s + c_y) \cdot (T_p s + 1) + k_p = T_p m_y s^3 + (n_y T_p + m_y) s^2 + (c_y T_p + n_y) s + c_y + k_p = 0 \quad (10)$$

Для этого воспользуемся критерием Гурвица [1]. Введем следующие обозначения:

$$T_p m_y = A_0; \quad T_p n_y + m_y = A_1; \quad T_p c_y + n_y = A_2; \quad c_y + k_p = A_3.$$

Все корни полинома (10) будут “левыми” (расположенными на левой комплексной полуплоскости), если

$$A_1 A_2 - A_0 A_3 > 0. \quad (11)$$

Подставив значения  $A_0, A_1, A_2, A_3$  в неравенство (11), получим условие устойчивости

$$n_y c_y T_p^2 + (n_y^2 - m_y k_p) \cdot T_p + m_y n_y > 0. \quad (12)$$

При

$$n_y c_y T_p^2 + (n_y^2 - m_y k_p) \cdot T_p + m_y n_y = 0. \quad (13)$$

динамическая система малого агрегатного станка будет находиться на границе области устойчивости (возможно появление автоколебаний). Следовательно, уравнение (13) выражает связь между параметрами процесса резания ( $T_p, k_p$ ) и параметрами упругой системы станка ( $m_y, n_y, c_y$ ) на границе области устойчивости.

Определим из уравнения (12) значение  $T_p$  на границе области устойчивости станка:

$$T_p = \frac{-(n_y^2 - m_y k_p) \pm \sqrt{(n_y^2 - m_y k_p)^2 - 4m_y n_y^2 c_y}}{2n_y c_y}. \quad (14)$$

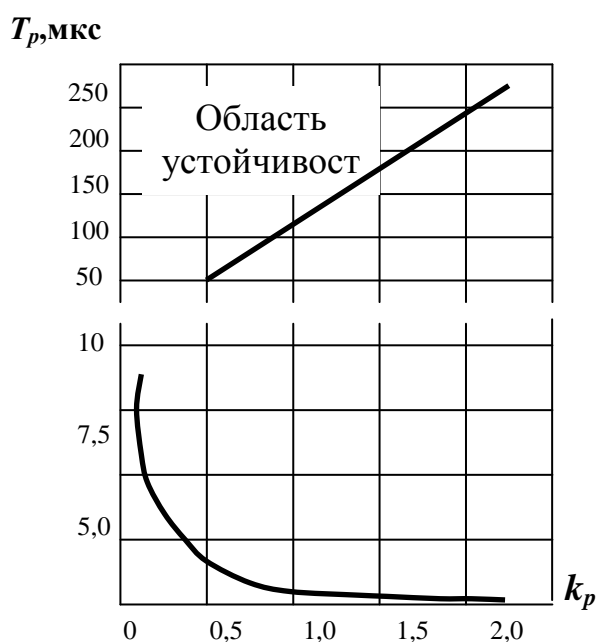
Как следует из формулы (13), экспериментальному значению  $k_p^{np}$  соответствует постоянная времени процесса резания;

$$T_p = \sqrt{\frac{m_y}{c_y}}. \quad (15)$$

при этом

$$k_p^{np} = 2n_y \sqrt{\frac{c_y}{m_y}} + \frac{n_y^2}{m_y}. \quad (16)$$

На (рис.2) дана диаграмма устойчивости в плоскости параметров  $T_p$  и  $k_p$  малого агрегатного станка, параметры упругой системы которого  $m = 20$  кг;  $n_y = 64$  Н·с/м;  $c_y = 26,5$  МН/м. Для построения областей устойчивости станка в плоскости параметров  $v$  и  $b_c$  (при фиксированных значениях  $a_0$ ) (рис.3) необходимо воспользоваться соотношениями (14), (3) и (4), а также экспериментальными значениями  $k$  и  $\xi$ , приведенные в таблице 1.

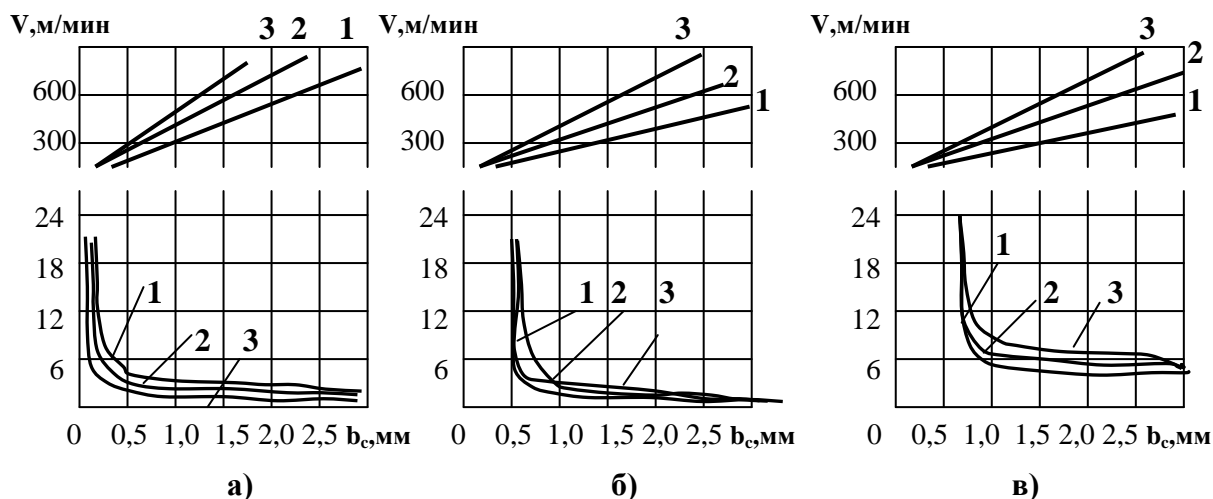


**Рис. 2** - Диаграмма устойчивости станка в плоскости параметров  $k_p$  и  $T_p$  ( $k_p^{np} = 0,15$  МН/м).

**Таблица 1.** - Экспериментальные значения  $k$  и  $\xi$  для различных материалов

Обрабатываемый материал	Сталь 45	Чугун СЧ21-40	Сплав АЛ-5
$k, \text{нН/м}^2$	1,25	0,8	0,6
$\xi$	2,0	1,3	3,6

Если жесткость резания меньше величены  $k_p^{np}$ , то при любой скорости резания (Рис.2) автоколебания не возникают (в соответствии с терминологией Эльясберга [5] это случай так называемой абсолютной виброустойчивости по скорости резания).



**Рис. 3** - Диаграммы устойчивости при сверлении материалов (стали 45– а, чугуна СЧ21- 40 – б, сплава АЛ5 – в.  
В случаях подачи, мм/об: 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,25.

Теоретические исследования динамической системы малого агрегатного станка полностью подтвердились экспериментальными исследованиями. Если жесткость резания меньше величены осевой составляющая силы резания, то при любой скорости резания автоколебания не возникают. Этот случай называется абсолютной виброустойчивости по скорости резания.

### Список использованных источников

1. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. Ч. 1. / А. А. Воронов. – М. ; Л. : Энергия, 1985. – 540 с.
2. Кудинов В. А. Динамическая характеристика резания / В. А. Кудинов // Станки и инструмент. – 1963. – № 10. – С. 1–7.
3. Шатерин М. А. О вибрациях спирального сверла / М. А. Шатерин // Автоматизация и технология машиностроения. – М. ; Л., 1970. – Вып. 314. – С. 73–76.

4. Шатерин М. А. Экспериментальное определение крутильно-осевых колебаний спиральных сверл / М. А. Шатерин // Машиностроение. – М. ; Л., 1973. – Вып. 321. – С. 240–245.
5. Эльясберг М. Б. Абсолютная виброустойчивость металлорежущих станков по скорости резания / М. Б. Эльясберг. // Станки и инструмент. – 1966. – № 4. – С. 8–11.

**Кондратюк О. Л.** Условия стойкости процесса резания при реализации операции глубокого сверления на малых агрегатных станках

Статья посвящена анализу особенностей процесса сверления и тонкостей обработки глубоких отверстий сверлами малого диаметра. На характеристики точности оказывают влияние как параметры режущего инструмента, так и параметры, характеризующие состояние процесса резания, в том числе его динамика. Изучение сил и движений во взаимосвязи с факторами, формирующими силы в координатах пространства состояния, уже является предметом динамики сверления глубоких отверстий малого диаметра. Необходимо отметить, что динамика этого процесса (а именно - изучение сил во взаимосвязи с движениями), до настоящего времени, практически не изучена. Именно раскрытие этих связей и анализ движения вершины инструмента в результате управляющих движений характеризует ту сферу знаний, которая позволяет раскрыть механизмы формирования геометрической погрешности при сверлении глубоких отверстий малого диаметра. При этом анализируется динамическая система сверления, включающая подсистему инструмента, схематизированную сосредоточенной массой, связанной с точкой закрепления инструмента упруго-диссипативными элементами, регулируемые приводы вращения шпинделя и скорости подачи пиноли. В свою очередь, инструмент, взаимодействующий с процессом резания, обработанной частью отверстия и стружкой, накапливающейся по мере заглубления, формирует нелинейные динамические связи.

**Кондратюк О. Л.** Умови стійкості процесу різання при реалізації операції глибокого свердлення на малих агрегатних верстатах

Стаття присвячена аналізу особливостей процесу свердлення і тонкощів обробки глибоких отворів свердлами малого діаметру. На характеристики точності роблять вплив як параметри ріжучого інструменту, так і параметри, що характеризують стан процесу різання, зокрема його динаміка. Вивчення сил і рухів у взаємозв'язку з чинниками, що формують сили в координатах простору стану, вже є предметом динаміки свердлення глибоких отворів малого діаметру. Необхідно відзначити, що динаміка цього процесу (а саме - вивчення сил у взаємозв'язку з рухами), до теперішнього часу, практично не вивчена. Саме розкриття цих зв'язків і аналіз руху вершини інструменту в результаті рухів, що управляють, характеризує ту сферу знань, яка дозволяє розкрити механізми формування геометричної погрішності при свердленні глибоких отворів малого діаметру. При цьому аналізується динамічна система свердлення, що включає підсистему інструменту, що схематизувала зосередженою масою, пов'язаною з точкою закріплення інструменту упруго-діSSIPATІВНИМИ елементами, регульовані приводи обертання шпінделя і швидкості подачі пінолі. У свою чергу, інструмент, що взаємодіє з процесом різання, обробленою частиною отвору і стружкою, що накопичується у міру заглиблення, формує нелінійні динамічні зв'язки.

**Kondratyuk O. L.** Terms of firmness of cutting process during the realization operation of the deep boring on small aggregate machine-tools

The article is devoted the analysis of features of process of boring and subtleties of treatment of the deep openings the drills of small diameter both the parameters of cutting instrument and parameters, characterizing the cutting process state, including his dynamics have influence on descriptions of exactness. Study of forces and motions in intercommunication with factors, forming forces in the coordinates of space of the state, already is the article of dynamics of boring of the deep openings of small diameter. It is necessary to mark that the dynamics of this



y

Py

V

process (namely is a study of forces in intercommunication with motions), up to date, practically is not studied. Exactly opening of these connections and analysis of motion of top of instrument as a result of managing motions characterizes the

that sphere of knowledge, which allows to expose the mechanisms of forming of

Рис.1. Расчетная схема упругой системы.

geometrical error at boring of the deep openings of small diameter. The dynamic system of boring, including the subsystem of instrument, schematized the concentrated mass, related to the point of fixing of instrument resilient elements, managed drives of rotation of spindle and speed of serve of tail spindle, is thus analyzed. In same queue, an instrument, interactive with the process of cutting, treated part of opening and shaving, accumulative as far as deepening, forms nonlinear dynamic connections of tail spindle.