

и с увеличением режимов резания увеличиваются. Общие технологические напряжения для данного опыта получены путем суммы двух родов напряжений (рис.).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Биргер И.А.** Остаточные напряжения. - М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
2. **Подзей А.В.** Технологические остаточные напряжения. - М.: Машиностроение, 1973. - 216 с.
3. **Лоладзе Т.Н.** Стружкообразование при резании металлов. - М.: Машгиз, 1973. - 318 с.
4. **Багдасарян Г.Б., Арутюнян Г.А., Багдасарян В.Г.** Определение основных углов резца по разрывному полю обрабатываемого материала // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. -1995. - Т.48, №1. – С.160 –164.
5. **Багдасарян Г.Б., Стакян М.Г., Багдасарян В.Г.** Метод определения оптимальной геометрии сверла в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1995.- Т.48, №3. - С. 166-170.
6. **Касьян М.В., Багдасарян Г.Б., Арутюнян Г.А.** Оптимизация технологических факторов при резании методом многофакторного планирования экспериментов. - Ереван: Айастан, 1990. - 161 с.
7. **Касьян М.В., Багдасарян Г.Б., Арутюнян Г.А.** Оптимизация режимов резания при решении технологических задач. - Ереван: Айастан, 1981. - 183 с.
8. **Хикс Ч.** Основные принципы планирования экспериментов.– М.: Машгиз, 1976. – 392 с.

ГИУА

05.06.1998

Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2000. Т. LIII, № 1.

УДК 921.9:531.3

МАШИНОСТРОЕНИЕ

В.А. АВАКЯН, А.В. ДАРБИНЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТАНКА С ЧПУ

Որոշված են հաստոցի առաձգական համակարգի և կտրման գործընթացի դինամիկական բնութագրերը՝ կախված կտրման ուժի ազդեցության ուղղությունից: Գնահատված է հաստոցի դինամիկական կայունությունը:

Определены динамические характеристики упругой системы станка и процесса резания в зависимости от направления действия силы резания. Дана оценка динамической устойчивости станка.

Ил.2. Табл.5. Библиогр.: 3 назв.

The dynamic characteristics of the machine flexible system and cutting process depending on the direction of cutting force are determined. The dynamic stability of the machine is evaluated.

Илл. 2. Tables 5. Ref. 3.

Отрезка, прорезка и профилирование относятся к технологическим операциям, при которых динамическая система станка чаще всего теряет устойчивость. Главными причинами этого явления служат переменность основных параметров процесса резания (силы и скорости) при осуществлении заземленного резания с коэффициентом перекрытия, равным единице, и переменность передаточной функции, описывающей упругую систему станка в зависимости от направления действия силы резания. Для установления оптимальной динамической характеристики упругой системы станка необходимо определить ее как функцию от пространственной ориентации силы резания. Так как развитие современных токарных станков с ЧПУ (далее станков) предполагает окончательную обработку деталей при их одноразовой установке, то динамическая характеристика упругой системы станка может служить критерием оценки оптимальности компоновки станка.

Динамическая система станка исследована по критерию асимптотической устойчивости [1], который соответствует процессам отрезки и прорезки:

$$K_p^A / K_{yc}^A = 0,5, \quad (1)$$

где $K_p^A = K_p / (1 + T_p^2 \omega^2)$, $H/мм$ - динамическая жесткость процесса резания; $K_{yc}^A = 1 / W_{yc}^A$, $H/мм$ - динамическая жесткость упругой системы станка; W_{yc}^A - динамическая податливость упругой системы станка, определяемая по выражению [2]:

$$W_{yc}^A = W_{yc}^{c \tau} / \sqrt{1 - \left(\frac{4\delta^2 + \sqrt{(2\delta)^4 + 16}}{4} \right)^2 (1 + 4\delta^2)}; \quad (2)$$

$K_p = \sigma_0 \xi b_{пр}$, $H/мм$ - коэффициент резания; $\sigma_0 = 1,3\sigma_b$ - условное напряжение; $T_p = Ca\xi / V$, c - постоянная времени стружкообразования; $\omega = 2\pi f_c$, c^{-1} - круговая частота автоколебаний; $W_{yc}^{c \tau}$ - статическая характеристика упругой системы станка; δ - коэффициент затухания; V - скорость резания.

Эксперименты проводились на токарном станке 16Б16Ф3-31 с ЧПУ. Первые серии экспериментов проводились на станке модели 16Б16КП (на базе которого изготавливаются станки с ЧПУ) традиционной компоновки. Был определен режим, при котором достигается наибольшая предельная ширина среза $b_{пр} = 8,5$ мм: частота вращения шпинделя 500 мин^{-1} , поперечная подача $0,1 \text{ мм/об}$. Получено эмпирическое выражение для $b_{пр}$ в зависимости от скорости резания, определяемой конечным диаметром заготовки:

$$b_{np} = 28,8 V_k^{-0,46}, \quad (3)$$

где V_k - скорость резания на конечном диаметре обработки, м/мин.

В другой серии экспериментов, проведенных также на базовом станке, была определена усадка стружки (ξ) в зависимости от режимов обработки и вида применяемых резцов. Полученные результаты позволили осуществить сравнительный анализ идентичных величин в зависимости от угла β , которым предопределялось взаимное расположение инструмента и заготовки относительно плоскости направляющих станка.

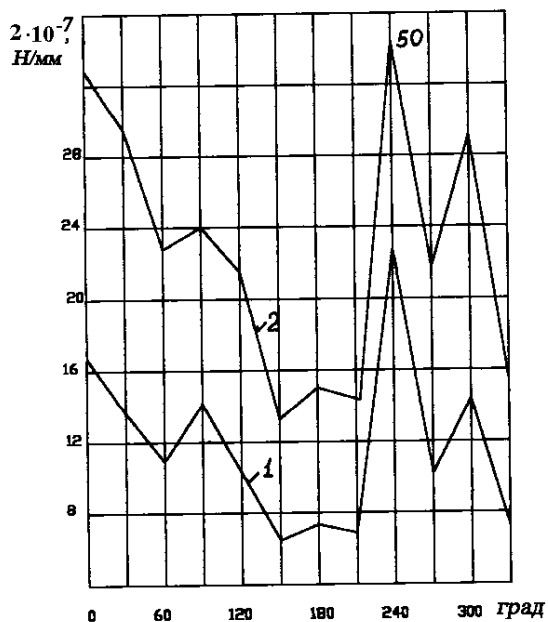


Рис. 1

установлены величина и размах колебаний силы резания, частотный спектр колебаний заготовки, частота автоколебаний по следам, b_{np} и V_k .

Путем проведения специальной серии экспериментов определены статическая характеристика упругой системы станка (табл.1) и спектр коэффициентов затухания δ узлов станка. По этим данным рассчитаны значения K_{yc}^A (рис.1).

Результаты экспериментов по определению b_{np} (табл.2) показали:

- в случае, если динамическая характеристика упругой системы станка постоянная, как это имеет место при традиционной компоновке базового станка, когда b_{np} однозначно определяется по (3), то разброс значений b_{np} примерно такой же, т.е. 0,5 мм при работе отрезными и 0,8 мм - прорезными резцами. В первом случае разброс составляет 1,6 мм, а во втором - 2,2 мм при практически постоянной величине V_k . Причиной этого

Эксперименты на исследуемом станке проводились при постоянном режиме в зависимости от угла β с применением отрезных и прорезных резцов со стандартной заточкой. Угол назначался при помощи специального устройства типа 1Э-40 с точностью $\pm 1^\circ$, осуществляющего механическую поперечную подачу и несущего тензометрический датчик с двойной тарировкой: по силе и перемещению [3]. При определении b_{np} обрабатывались ступенчатые заготовки. ξ определялась весовым методом. При этом заготовки имели взаимоперпендикулярные отверстия, обеспечивающие получение надрезов по краям стружек. По этим надрезам устанавливалась расчетная длина стружки. Обеспечивалось постоянство свойств обрабатываемого материала, точек приложения усилий, вылетов резца и заготовки, а также условий измерений и записи осциллографированием. Были

является, в первую очередь, переменность динамической характеристики упругой системы станка при различных значениях угла β ;

- значения V_k при изменении угла β в пределах $0...360^\circ$ постоянные, поэтому по (3) получен незначительный разброс $b_{пр}$;

- при работе прорезными резцами достигнута более высокая устойчивость процесса резания, чем при работе отрезными резцами, если судить по количеству значений $b_{пр} > 6$ мм: 6 случаев при работе отрезными и 8 случаев - прорезными резцами. Здесь очевидно влияние других параметров процесса резания - ξ , ω и T_p .

Таблица 1

Статическая податливость станка, мм/Н · 10⁻⁶

Угол β , град	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
$W_{ус}^{с т}$	27	31,2	40,3	32,9	43,1	68,8	61,1	63,4	18,7	44,6	31,2	61,5

Таблица 2

Предельная ширина среза, мм

Угол β , град	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Резцы отрезные	5,80	4,6	5,8	6,2	6,2	6,4	5,7	6,1	4,7	6,2	5,9	6,3
$b_{пр}$ по (3)	4,9	4,9	4,9	5,1	5,1	5,4	4,9	5,0	4,7	5,1	4,9	5,2
Резцы прорезные с R=3 мм	6,4	4,5	5,8	6,3	6,3	6,6	6,7	6,0	-	6,2	6,2	-
$b_{пр}$ по (3)	5,15	4,9	4,9	5,2	5,3	5,45	5,45	5,0	5,0	5,1	5,2	5,7

Анализом осциллограмм и подсчетов следов на заготовках определены доминирующие в автоколебательном процессе частоты: 92, 167 Гц (подсистема заготовки и суппортная группа с установленным устройством типа 1Э-40 [3]) и 821 Гц. Значения T_p определены при постоянной толщине среза $a = 0,1$ мм и коэффициенте $C = 1$, т.к. передний угол резцов (γ) и свойства обрабатываемого материала (Сталь 45) постоянные (табл.3).

Как показали эксперименты, зависимость ξ от β (табл.4) нечеткая при работе отрезными и прорезными резцами. Перепад значений ξ в обоих случаях составляет 0,6, что можно объяснить практически одинаковым соотношением толщины среза к ее ширине (разница составляет 0,002 мм). Изменение резцов этого соотношения происходит из-за наличия у прорезных резцов радиуса.

Таблица 3

Постоянная времени стружкообразования, с

Угол β , град	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Резцы отрезные	2,6	2,5	3,8	4,2	3,7	4,1	3,4	3,2	3,1	3,45	3,5	3,75
Резцы прорезные с R=3 мм	3,5	3,3	3,2	3,35	4,1	4,1	4,85	3,65	3,65	3,45	3,8	4,6

Таблица 4

Усадка стружки

Угол β , град	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Резцы отрезные	2	2	3	2,9	2,6	2,6	2,8	2,4	2,6	2,6	2,6	2,6
Резцы прорезные с $R = 3 \text{ мм}$	2,4	2,8	2,6	2,4	2,7	2,7	2,7	3,1	2,8	2,6	2,6	2,6

Значения K_p определены по экспериментальным данным величин ξ и $b_{пр}$ при постоянном $\sigma_0 = 1,3 \sigma_B$ и идентичны со значениями статического коэффициента резания: $K_p^{c \cdot T} = P_z / a \cos \gamma$.

Результаты расчетов K_p^A (табл. 5) показали, что

- наибольшие значения K_p^A имеют место при малых ω ;
- при работе прорезными резцами значения K_p^A больше, чем при работе отрезными на частотах $\omega_1 = 578 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_2 = 1049 \text{ с}^{-1}$, а на частоте $\omega_3 = 5156 \text{ с}^{-1}$ примерно одинаковы;
- влияние угла β сказывается на K_p^A в пределах $60 \dots 150^\circ$ при работе отрезными резцами и $150 \dots 180^\circ$ - прорезными резцами;
- значения K_p^A на частотах ω_1 и ω_2 отличаются на $\pm 3,2 \%$ при отрезных и на $\pm 6 \%$ при прорезных работах в связи с относительно малой (не более 3,3 раза) разницей произведения $T_p^2 \cdot \omega^2$ при этих частотах.

Таблица 5

Динамическая жесткость процесса резания, $H/\text{мм} \cdot 10^3$

Резцы	Кру- говая час- тота, с ⁻¹	Угол, град											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Отрезные	578	10,7	8,1	17,9	18,4	15,3	18,0	14,0	12,4	10,7	14,3	14,7	15,4
	1049	10,4	7,8	16,4	16,4	13,8	16,0	13,2	12,0	10,0	13,2	13,9	15,0
	5156	3,6	2,8	3,4	2,8	2,9	2,8	3,4	3,4	3,1	3,5	3,4	2,9
Прорезные с R=3 мм	578	13	14	15,6	13,8	17,2	18,6	20,8	14,6	15,4	17,2	16,8	15,6
	1049	12	12,2	14,4	12,5	15,8	16	17,9	13,3	13,6	13,8	15	13
	5156	2,7	2,7	3,5	3	2,6	2,6	2,4	3,2	3,1	2,6	3	2,2

Оценку устойчивости динамической системы станка производили по отношению $S = K_p^A / K_{ус}^A$, сопоставляя его с критерием (1). Предварительный анализ показал, что при ω_1 и ω_2 значения S только в одном случае (из 48) отличаются на 0,4, а в остальных разница не превышает 0,1, причем в 12 случаях совпадают. На рис 2 приведены усредненные значения S

(линии 1 и 2). Значения C на частоте ω_3 практически одинаковы при работе отрезными и прорезными резцами и отличаются в зависимости от коэффициента затухания (линия 3).

Как видно, характер изменения C от угла β идентичен при различных δ и применяемых видов резцов. Наибольшие значения C имеет в пределах $\beta = 150 \dots 210^\circ$, что соответствует минимальным значениям динамической характеристики упругой системы станка (рис.1). Максимальная неустойчивость динамической системы станка проявляется при $\delta = 0,19$, которым характеризуется подсистема заготовки в вертикальном направлении.

При $\delta = 0,19$ на частотах ω_1 и ω_2 в случае работы отрезными резцами (рис.2а) динамическая система станка асимптотически устойчива ($C \leq 0,5$) при трех значениях (0° ; 30° ; 240°) и абсолютно устойчива ($0,5 < C < 1$) при пяти значениях угла β (0° ; 30° ; 90° ; 240° ; 300°). Как видно, устойчивость динамической системы станка предопределяется не величиной угла β , а соотношением динамических характеристик процесса резания и упругой системы при данном значении угла. При других значениях угла степень неустойчивости динамической системы станка выходит за пределы $C=1$. Причем она становится выше при работе прорезными резцами (8 случаев из 12). На частоте ω_3 динамическая система станка асимптотически устойчива при всех значениях угла β : $C=0,1 \dots 0,45$. Устойчивость динамической системы станка на этой частоте объясняется малыми значениями K_p^A , которые в пять раз меньше, чем при ω_1 и ω_2 . Это, в свою очередь, предопределяется тем, что при ω_3 произведение $T_p^2 \cdot \omega^2$ на два порядка выше, чем при ω_1 и ω_2 .

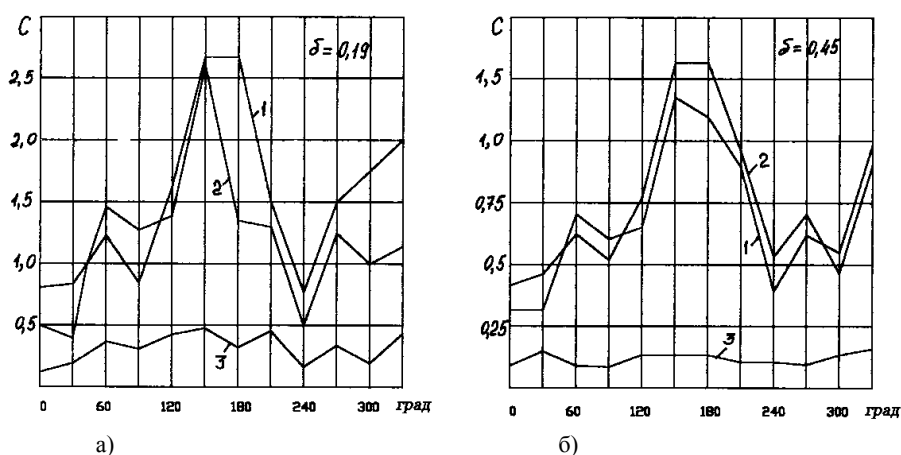


Рис.2

При $\delta = 0,45$ на частотах ω_1 и ω_2 (рис. 2б) динамическая система станка асимптотически устойчива при четырех значениях угла β при работе отрезными и пяти значениях - при работе прорезными резцами. Динамическая система станка абсолютно устойчива при всех значениях угла β , кроме углов 150° и 180° . В этом случае значения C также

преобладают (8 случаев из 12) при работе прорезными резцами. Можно отметить, что при $\delta = 0,45$, которым характеризуется подсистема заготовки в горизонтальном направлении, обеспечиваются более широкие области устойчивости динамической системы станка. На частоте ω_3 динамическая система станка асимптотически устойчива во всем диапазоне изменения угла β . Разница между значениями C при $\delta = 0,19$ и $0,45$ объясняется величиной и направлением коэффициентов затухания. С другой стороны, практически величина C постоянная и равна $0,15$, что, при прочих равных условиях, объясняется относительно высоким демпфирующим влиянием процесса резания при прорезке в случаях, когда постоянная времени демпфирования $T_{\text{нр}}$ превосходит значение T_p . Это имеет место при тех значениях угла β , когда ξ при прорезке больше, чем при отрезке (табл.4), т.к. $T_{\text{нр}}$ при постоянных C_1, a, V предопределяется величиной ξ .

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Произведена оценка динамических характеристик процесса резания и упругой системы станка в зависимости от направления действия силы резания при различных значениях коэффициента затухания, усадки стружки и частоты автоколебаний. Выявлены области действия силы резания, в которых динамическая система станка устойчива по критериям абсолютной и асимптотической устойчивостей.

2. Показано, что при высокопроизводительном режиме обработки динамическая система станка асимптотически устойчива при $\beta=0...30^\circ$ и 240° . Устойчивость динамической системы станка предопределяется соотношением динамических характеристик процесса резания и упругой системы станка при определенных значениях угла β .

3. Установлено, что при постоянном значении динамической характеристики упругой системы станка $b_{\text{нр}}$ однозначно определяется скоростью резания на конечном диаметре обработки.

4. Выявлено, что при минимальной $K_{\text{yc}}^A = 13600 \text{ Н/мм}$ (при $\delta=0,45$) динамическая система станка устойчива во всем диапазоне угла β , если K_p^A в 3,2 раза меньше K_{yc}^A .

5. Показано, что при изменении частоты автоколебаний в пределах $92...167 \text{ с}^{-1}$ устойчивость динамической системы станка изменяется не более, чем на 20%.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кудинов В.А.** Динамика станков. - М.: Машиностроение, 1967. - 360 с.
2. **Есаян П.А.** Повышение устойчивости технологической системы при различных схемах резания воздействием на пространственную ориентацию элементов автоколебательного контура станка с ЧПУ: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Ереван, 1984. - 23 с.
3. **А.с. 1282968** СССР, МКИ В 23 В 25/06. Устройство для определения динамических характеристик металлорежущих станков / **А.В. Дарбинян** и др. (СССР). - № 3936080 / 25-08; Заявлено 26.07.85; Опубл. 15.01.87, Бюл. № 2. - 4 с.

ООО "Агуйц ЛТ", АООТ "Интерстанок"

04.03.1998