

УДК 621.9.06-192:620.1

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА МЕТАЛЛОРЕЗУЮЩЕГО СТАНКА С ЧПУ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ

А.П.Кузнецов, В.П.Горбунов

При эксплуатации металлорежущих станков с ЧПУ важно обеспечить требуемую точность обработки деталей и сохранять ее в течение заданного периода времени, что характеризуется вероятностью безотказной работы (ВБР) по выходному параметру станков.

В течение межналадочного периода начальное значение ВБР изменяется вследствие действия процессов средней скорости, основными из которых являются тепловые деформации узлов и деталей станка. ВБР станка по выходному параметру в конце межналадочного периода, согласно [1,2],

$$P(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{\delta - \sum_i \Delta_i}{\sqrt{\sum_i \sigma_i^2}}\right) = 0,5 + \Phi(A), \quad (1)$$

где  $\delta$  - допуск на параметр;  $\Delta_i, \sigma_i^2$  - математические ожидания и дисперсии составляющих погрешностей;  $\Phi(A)$  - функция Лапласа, лежащая в пределах от нуля до 0,5.

Рассмотрим формирование и изменение начальной ВБР по параметру "точность размера вдоль координаты ОУ" (например, точность межцентровых расстояний) для станков сверлильно-фрезерно-расточной группы вертикальной компоновки (рис.1).

Точность получения линейного размера вдоль координаты ОУ определяется точностью выхода рабочего органа станка в запрограммированное положение, определяемой точностью взаимосвязанных относительных движений салазок и стола, несущего заготовку (плоскость ХОУ), а также точностью перемещения и положения шпиндельной бабки (плоскость ZOУ) относительно рабочей поверхности стола. Сформированный размер вдоль ОУ в плоскости ХОУ изменяется вследствие геометрических погрешностей непрямолинейности и неперпендикулярности перемещения шпиндельной

бабки по колонне станка (плоскость  $ZOY$ ).

В процессе работы станка нагрев его базовых деталей и узлов приводит к изменению начальных геометрических характеристик станка, которое ранее не учитывалось при расчете ВБР станка.

Для станков данной компоновки размещение основных тепло-выделяющих узлов относительно колонны обуславливает неравномерность ее нагрева. Это приводит к значительным тепловым деформациям колонны. Неравномерный нагрев передней и задней стенок колонны, характеризуемый разностью температур  $\Delta T_H$ , обусловит тепловые смещения колонны в направлении  $OY$ , которые можно определить по известной зависимости  $\Delta Y = (\beta L^2 / (2B)) \Delta T_H$ , где  $L, B$  - высота и ширина колонны (см. рис. 1),  $\beta$  - коэффициент температурного расширения материала.

Изменение величины отклонения от перпендикулярности перемещения шпиндельной бабки при нагреве станка формируется только на величине ее хода  $L_1 - L_2$ , где  $L_1, L_2$  - размеры, соответствующие верхнему и нижнему положениям шпиндельной бабки. Поэтому отклонение от перпендикулярности  $\Delta_2^T$ , обусловленное нагревом станка, может быть определено следующим образом:

$$\Delta_2^T = \beta \frac{L_1^2 - L_2^2}{2B} \Delta T_H = \beta K_\beta \Delta T_H, \quad (2)$$

где  $K_\beta$  - коэффициент, характеризующий изменение величины отклонения от перпендикулярности перемещения шпиндельной бабки при разности температур между передней и задней стенками колонны  $1^\circ\text{C}$ .

При нагреве станка в любой период его работы величина отклонения от перпендикулярности будет иметь две составляющие, т.е.

$$\Delta_2 = \Delta_2^H \pm \Delta_2^T = \Delta_2^H \pm \beta K_\beta \Delta T_H, \quad (3)$$

где  $\Delta_2^H$  - величина отклонения от перпендикулярности в начальном состоянии, знак ( $\pm$ ) определяет направление наклона колонны в системе координат станка.

По формуле (3) можно определить также допустимое значение разности температур между стенками колонны, что позволит получить величину отклонения от перпендикулярности в пределах ее начального значения, т.е. при  $\Delta_2^H - \Delta_2^T = 0$ . Следовательно,

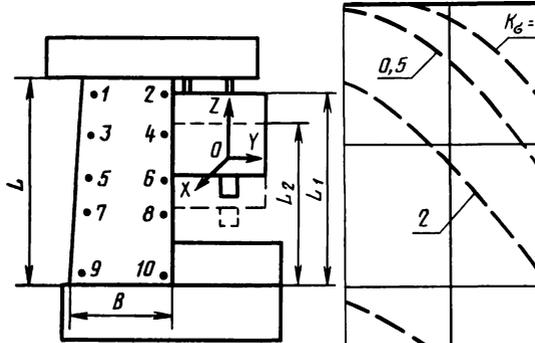


Рис. 1

Рис. 2

-3 -2

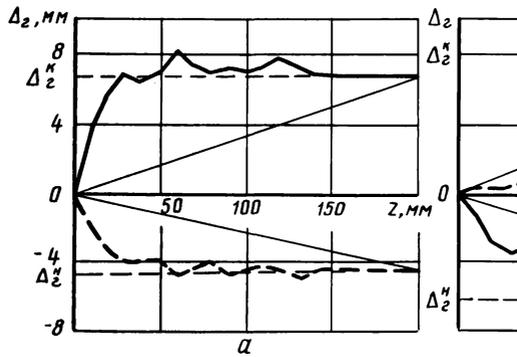


Рис. 3

$$\Delta T_H = \Delta_2^H / (\beta K_\beta). \quad (4)$$

Изменяющийся температурный режим станка оказывает также влияние на другие параметры, формирующие ВБР по выходному параметру за межналадочный период. Поэтому по аналогии с (3) можно записать в общем виде  $\Delta_i = \Delta_i^H \pm \Delta_i^T$ , где  $\Delta_i^H$  - математическое ожидание  $i$ -й начальной погрешности;  $\Delta_i^T$  - математическое ожидание  $i$ -й погрешности, обусловленной нагревом.

Выражение (I), с учетом независимости составляющих погрешностей  $\Delta_i$ , примет вид

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left( \frac{\delta - \Delta_{np} - \sum_i \Delta_i^H - \sum_i \Delta_i^T}{\sqrt{\sum_i (\sigma_i^H)^2 + \sum_i (\sigma_i^T)^2}} \right) = 0,5 + \Phi(A^T), \quad (5)$$

где  $\Delta_{np}$  - погрешность программирования;  $(\sigma_i^H)^2, (\sigma_i^T)^2$  - дисперсии составляющих погрешностей, начальная и обусловленная нагревом.

Составим отношение величин в функции Лапласа, входящих в зависимости (I, 5),

$$\frac{A}{A^T} = \frac{(\delta - \Delta_{np} - \sum_i \Delta_i^H) \sqrt{\sum_i (\sigma_i^H)^2 + \sum_i (\sigma_i^T)^2}}{\sqrt{\sum_i (\sigma_i^H)^2} (\delta - \Delta_{np} - \sum_i \Delta_i^H - \sum_i \Delta_i^T)} = \xi. \quad (6)$$

Обозначим через  $K_g = \sum_i \Delta_i^T / (\delta - \Delta_{np} - \sum_i \Delta_i^H)$  коэффициент, характеризующий долю систематических погрешностей станка, обусловленных нагревом, среди суммы начальных погрешностей,  $K_\sigma = \sum_i (\sigma_i^T)^2 / \sum_i (\sigma_i^H)^2$  - коэффициент, характеризующий долю случайных составляющих погрешностей станка, обусловленных нагревом, среди суммы случайных составляющих начальных погрешностей станка. Тогда выражение (6) примет вид

$$\xi = \sqrt{1 + K_\sigma} / (1 - K_g). \quad (7)$$

Выражение (7) характеризует величину изменения значений погрешностей в функции Лапласа с учетом степени влияния теплового режима работы станка на его ВБР по выходному параметру. Можно записать

$$P(t) = 0,5 + \Phi(A/\xi). \quad (8)$$

Из анализа выражения (8) видно, что тепловой режим станка может как улучшать, так и ухудшать его ВБР. Это зависит от степени подверженности той или иной погрешности воздействию температурного поля станка и его узлов, что отразится на знаке и величине коэффициента  $\xi$ .

Коэффициент  $\xi$  может принимать значения, которые определяются знаком и величиной  $K_p$ , так как всегда  $\sqrt{1+K_c} \geq 1$ , а знак  $K_p$  зависит от того, в каком направлении действуют погрешности, обусловленные тепловыми деформациями узлов и деталей станка. На рис.2 приведены зависимости ВБР от значений  $K_p$  и  $K_c$ , реально встречающихся на практике, для случаев, когда начальная ВБР станка равна 1,0 (оплошные линии) и 0,75 (штриховые линии).

Из рис.2 можно сделать следующие выводы:

если  $0 < K_p < 1$  ( $\xi > 1$ ), то  $P(t)$  уменьшается незначительно и находится всегда в пределах от 0,5 до 1;

в области  $K_p < 0$  ( $\xi$  - всегда положительная величина) значения  $P(t)$  всегда растут с уменьшением  $K_p$ , когда выполняется неравенство  $\sqrt{1+K_c} < 1 - K_p$ .

Когда  $K_p > 1$  ( $\xi < 0$ ), значения  $P(t)$  всегда менее 0,5, что недопустимо по требованиям НТД.

Таким образом, анализируя только значения коэффициентов  $K_p$  и  $K_c$ , можно судить о поведении  $P(t)$  и, следовательно, о влиянии на нее теплового режима станка.

Для подтверждения характера влияния теплового режима на изменение начальных погрешностей были проведены теоретические и экспериментальные исследования температурных полей и деформаций и их влияния на отклонение от перпендикулярности перемещения шпиндельной бабки вдоль координаты ОУ вертикально-фрезерного станка с ЧПУ модели 6520Ф3 и многоцелевого станка с ЧПУ модели 243ЕМФ2, имеющих общие конструктивно-компоновочные признаки, обуславливающие их нагрев, но отличающихся геометрическими параметрами, назначением, классом точности. Далее будем станок 6520Ф3 условно обозначать "модель А", а 243ЕМФ2 - "модель Б". Для определения величин отклонений от перпендикулярности перемещения шпиндельной бабки использовался самопишущий прибор модели 260 завода "Калибр" и поверочный угольник 90°. Измерения проводились в налабочном режиме в пределах рабочего хода шпиндельной бабки с непрерывной записью на электротермической бумаге в прямоугольной системе координат.

Приведем зависимости отклонений (в направлении ОУ) от перпендикулярности  $\Delta_z$  при перемещении шпиндельной бабки вдоль координаты Z для станков моделей А (рис.3а) и Б (рис.3б) в начальном состоянии (штриховые линии) и через 6 ч непрерывной

работы (оплошные линии) при частоте вращения шпинделя 1600 об/мин (модель А) и 2500 об/мин (модель Б). Как видно из рис.3, на размере  $Z = 200$  мм начальные погрешности  $\Delta_z^H$  равны  $-4,5$  и  $-6$  мкм, а через 6 ч работы погрешности  $\Delta_z^K$  составили 7 и 8 мкм. При этом  $\Delta T_H$  соответственно равны 2,3 и 2,45 °С.

Значения температур на передней и задней стенках колонны определялись при помощи термопар и регистрирующего прибора КСП-4 (схему установки термопар см. на рис.1). Распределения температур  $T$  вдоль размера  $L$  приведены на рис.4 (а - для модели А; б - для модели Б), где заштрихована область разностей температур, а номера точек соответствуют номерам термопар.

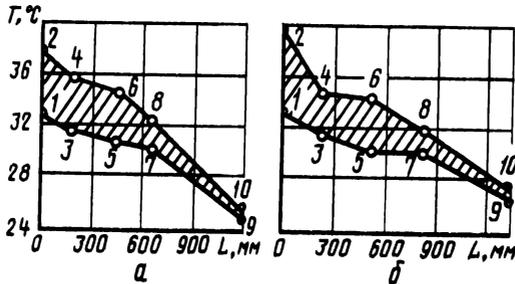


Рис.4

Отклонения от перпендикулярности перемещения шпиндельной бабки, обусловленные неравномерностью нагрева колонны и определенные по формуле (2), составляют 12,2 мкм (модель А) и 15,2 мкм (модель Б). Тогда результирующие величины отклонений от перпендикулярности, вычисленные по формуле (3), соответственно равны 7,7 и 9,2 мкм. Сравнение расчетных значений  $\Delta_z$  с экспериментальными показывает, что получается погрешность 10–15%.

Определим коэффициент  $K_{\beta}$ ; он равен 0,46 (модель А) и 0,54 (модель Б). Следовательно, станок модели Б более подвержен влиянию неравномерности нагрева, что подтверждается экспериментальными данными (см.рис.3).

Допустимая величина неравномерности нагрева из условия невыхода величины отклонения от перпендикулярности за пределы его начального значения вычислена по формуле (4): 0,85 °С (модель А) и 0,97 °С (модель Б). Значения  $\Delta T_H$ , полученные экспериментально, превышают величины, определенные расчетом.

ВБР станков определялась по экспериментальным данным при значениях допуска на получаемый линейный размер 130 мкм (модель А) и 60 мкм (модель Б) и значениях математических ожиданий  $\Delta_i$  составляющих погрешностей и их средних квадратических отклонений  $\sigma_i$ , представленных в таблице (в микрометрах), где индексы *пр, поз, с.и, вэ, ж, т, н, б* относятся к погрешностям программирования, позиционирования, смены инструмента, взаимодействия с системой ЧПУ, упругих деформаций, тепловых деформаций, наладки, от быстро протекающих процессов.

$\Delta_i$	$\Delta_{пр}$	$\Delta_z^H$	$\Delta_{поз}$	$\Delta_{с.и}$	$\Delta_{вэ}$	$\Delta_{ж}$	$\Delta_{т}$	$\Delta_z^K$	$\Delta_n$	$\Delta_b$
Модель А	10	-4,5	22	0	0	15	72	7	-	-
Модель Б	1	-6	2	0	0,25	10	37	8	-	-
$\sigma_i$	$\sigma_{пр}$	$\sigma_z^H$	$\sigma_{поз}$	$\sigma_{с.и}$	$\sigma_{вэ}$	$\sigma_{ж}$	$\sigma_{т}$	$\sigma_z^K$	$\sigma_n$	$\sigma_b$
Модель А	-	0,5	3,5	0	3	0	4	1,2	0	0,2
Модель Б	-	0,3	1,8	0,5	0,25	0	2,5	1,4	0	0,2

Начальное состояние станка характеризуется ВБР 0,9945 (модель А) и 0,9999 (модель Б), определенным по формуле (1).

Определим по формуле (7)  $\xi = 3,4$  (модель А),  $\xi = 10$  (модель Б). Тогда ВБР станка в конце межналадочного периода (после 6 ч работы), определенная по формуле (8), составит 0,7734 (модель А) и 0,6915 (модель Б).

Сравнивая значения  $P(t)$ , полученные по формулам (1,8), видим, что дополнительный учет погрешностей отклонений от перпендикулярности, вызванных нагревом станков, снижает начальные значения ВБР.

Можно учесть также влияние нагрева станка на другие параметры, например, точность позиционирования и жесткость, которые составляют (в микрометрах):  $\Delta_{поз}^T = 5$ ,  $\sigma_{поз}^T = 1,5$ ,  $\Delta_{ж}^T = -8$ ,  $\sigma_{ж}^T = 0,7$  (модель А) и  $\Delta_{поз}^T = 0,5$ ,  $\sigma_{поз}^T = 0,5$ ,  $\Delta_{ж}^T = -6$ ,  $\sigma_{ж}^T = 0,5$  (модель Б). При  $K_{\beta} = 0,59$ ,  $K_{\sigma} = 0,11$ ,  $\xi = 2,57$  значение  $P(t) = 0,8389$  (модель А) и  $K_{\beta} = 0,54$ ,  $K_{\sigma} = 0,25$ ,  $\xi = 2,43$  значение  $P(t) = 0,9803$  (модель Б).

Таким образом, тепловой режим станка оказывает значительное влияние на изменение его начальных параметров, которые формируют также уровень его надежности по параметру за межналадочный период. Это влияние может быть учтено коэффициентом  $\xi$ .

Значения величин отклонения от перпендикулярности перемещения шпиндельной бабки можно рассчитать по зависимостям (2,3).

Используя предложенные зависимости и коэффициенты, можно, исходя из известных погрешностей, формирующих линейный размер, назначать тот или иной квалитет точности обработки деталей, а также назначать такие конструктивные параметры станка, изменением которых можно добиться минимальных отклонений при заданном тепловом режиме.

#### Список использованной литературы

1. Проников А.С. Надежность машин. - М.: Машиностроение, 1978.
2. Кузнецов А.П., Уколов М.С. Влияние тепловых деформаций на уровень технологической надежности станков. - Изв. вузов. Сер. Машиностроение, 1979, № 2.

Статья поступила 03.II.80

---

#### Вниманию читателей!

В 1983 г. намечено провести III Всесоюзное совещание по физике отказов.

Цель совещания - обсуждение физических аспектов надежности технических средств различного назначения (систем управления, ЭВМ, радиозлектронной аппаратуры и др.) и комплектующих элементов (электронных, электротехнических, пневматических, гидравлических, механических). Намечено также рассмотрение вопросов анализа и моделирования отказов, методов проведения исследований и необходимого приборного оснащения, применения ЭВМ для расчетов и обработки информации.

На пленарных заседаниях будут заслушаны доклады по общим вопросам физики отказов.

Специалисты, желающие выступить на совещании с докладами (сообщениями), должны представить в его оргкомитет до I марта 1982 г. тезисы (рефераты) объемом до двух машинописных страниц в двух экземплярах. Адрес: 117342, Москва, Профсоюзная ул., д.65, Институт проблем управления. Оргкомитет совещания по физике отказов. Тел. 334 91 30, 334 88 11.