

В.И.Ходырев, канд. техн. наук,  
В.А.Молочков, Е.Л.Машканцев (ММИ)

## СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ ВИНТОВЫМ РОТАЦИОННЫМ РЕЗЦОМ

Сложность процесса формообразования при точении винтовым ротационным резцом (ВРР) обусловлена как сложностью пространственной конфигурации режущих кромок и их относительного движения в обрабатываемом материале, так и непрерывным перемещением активных участков режущих кромок вдоль оси вращения резца. Отсутствие аналитических решений, определяющих форму обработанной поверхности и ее характеристики, а также высокая стоимость и трудность построения модели на основе сбора экспериментальных данных обусловили имитационное моделирование как наиболее рациональный метод исследования и оптимизации процесса точения ВРР. В основу математической модели положены уравнения (1) вращающейся (угол  $\Psi$ ) винтовой (параметр  $\Psi$ ) правой или левой (код  $K_H$ ) однозаходной или многозаходной (число заходов  $i$ ) режущей кромки шага  $h$  и радиуса  $r$ , движущейся (подача  $s$  в мм/об) вдоль образующей поверхности детали радиуса  $R$ :

$$\begin{cases} x_j = -r \sin(\Psi - \varphi_j) \cos \epsilon - m \Psi \sin \epsilon - s \alpha / 2\pi; \\ y_j = -r \cos(\Psi + \varphi_j) + R + r; \\ z_j = -r \sin(\Psi + \varphi_j) \sin \epsilon + m \Psi \cos \epsilon, \end{cases} \quad (1)$$

где  $m = K_H h_i / 2\pi$  - винтовой параметр;  $\alpha$  - угол поворота детали;  $\epsilon$  - угол наклона оси режущей кромки;  $\varphi_j = K_n \alpha + K_H 2\pi x$  ( $j - 1$ )/ $i$  - угол поворота режущей кромки  $j$ -го захода,  $j = 1, 2 \dots i$ ;  $K_n$  - соотношение частот вращения резца и детали.

Поверхность резания, представленная в виде режущих кромок ВРР, совершающего относительное движение в обрабатываемом материале, задается уравнениями, аналогичными уравнениям (1), поэтому точка пересечения режущей кромки с поверхностью резания находится из системы трех трансцендентных уравнений (2), записанных в обобщенной форме, где  $x, y, z$  определяются выражениями (1). Из этих уравнений для известного положения детали  $\alpha$  находятся:  $\Psi$  - параметр, определяющий точку, которая ограничивает активный участок режущей кромки;  $\Psi_{LL}$  - параметр, задающий точку пересечения поверхности резания;  $\alpha_{LL}$  - угол, соответствующий положению детали в момент формирования искомой точки поверхности резания. Учитывая, что  $\alpha \approx \alpha_{LL} + 2\pi n$ , можно с точностью, достаточной для практиче-

ских целей, перейти к системе (3) двух трансцендентных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} x_j(\psi, \alpha) = x_k(\psi_{LL}, \alpha_{LL}); \\ y_j(\psi, \alpha) = y_k(\psi_{LL}, \alpha_{LL}); \\ z_j(\psi, \alpha) = z_k(\psi_{LL}, \alpha_{LL}); \end{array} \right. \quad (2) \quad \left\{ \begin{array}{l} x_j(\psi) = x_k(\psi_{LL}); \\ \rho_j^2(\psi) = \rho_k^2(\psi_{LL}); \\ \rho_j^2 = y_j^2 + z_j^2 \end{array} \right. \quad (4)$$

и рассматривать задачу определения профиля поверхности резания и обработанной поверхности в радиальных плоскостях детали, которые не меняют своего положения относительно детали при ее вращении. Число таких плоскостей определяется требуемой точностью характеристик профиля детали и величиной их рассеивания. Положение плоскостей (угол  $\alpha$ ) принимается случайным и подчиняется равномерному распределению в интервале  $(0 - 2\pi)$ . Поставив в соответствие рассматриваемым оборотам детали номера  $i_p = 1, 2 \dots$ , начиная с исходного положения, получим, что

$$\varphi_j = K_n [(i_p - 1)2\pi + \alpha] + K_H 2\pi(j - 1)/i,$$

и профиль поверхности детали получается как следствие образования профилей поверхностей резания при последовательном увеличении числа совершенных деталью оборотов  $i_p$ . Величина  $i_p$ , необходимая для полного описания профиля, зависит от  $K_n$ , числа заходов  $i$  и определяется из условия равенства целому числу результата выражения  $K_n i_p$ . Практически моделирование проводилось для большего значения  $i_p$ , чтобы не исключить влияния вероятного участия в формообразовании режущих кромок резца на оборотах, соседних с рассматриваемыми. Результатом моделирования профиля являются следующие характеристики составляющих его участков: порядковый номер участка  $l$ ; оборот, в котором он сформирован,  $i_p$ ; номер  $j$  захода режущей кромки, сформировавшей этот участок; границы участка  $\psi_{BX}, x_{BX}, R_{BX}, \psi_{BU}, x_{BU}, R_{BU}$ . Минимальный радиус участка формируется вершиной режущей кромки, параметр  $\psi$  которой определяется решением уравнения  $\rho_x^l = 0$ , причем функция  $\rho(x)$  задана параметрически выражениями (1), (4). После дифференцирования получим трансцендентное уравнение

$$y_j r \sin(\psi + \varphi_j) + z_j [-r \sin \epsilon \cos(\psi + \varphi_j) + m \cos \epsilon] = 0, \quad (5)$$

где  $y_j$  и  $z_j$  определяются из выражения (1).

Для полученного профиля поверхности детали рассчитываются следующие характеристики: средний шаг неровностей профиля по вершинам  $S$ , средний шаг неровностей профиля  $S_m$ , наибольшая высота неровностей профиля  $R_{max}$ , относительная опорная длина профиля  $t_{50}$  и отношение  $S_m/R_{max}$ , характеризующее тип отклонений профиля:

- при  $S_m/R_{\max} < 50$  - шероховатость;  
 при  $50 \leq S_m/R_{\max} \leq 1000$  - волнистость;  
 при  $S_m/R_{\max} > 1000$  - погрешности формы.

На основании имитационного моделирования, проведенного на ЭВМ ЕС-1022-02, при очередном варьировании факторов выяснен механизм и оценена степень влияния каждого из них на процесс формообразования поверхности детали.

Первичные факторы  $s$ ,  $h$ ,  $\epsilon$ ,  $R$ ,  $r$  влияют на формообразование двояко: как непосредственно, так и через соотношение  $K_n$ , причем степень непосредственного влияния невелика. Так, при  $r = 20$  мм,  $K_n = 0,8$ ;  $i = 1$ ;  $h = 6$  мм;  $R = 32,5$  мм трехкратное увеличение подачи (от 0,3 до 0,9 мм/об) приводит к увеличению  $R_{\max}$  на 23 мкм (от 14 до 37 мкм), в то время как для призматического резца с радиусом при вершине 1,0 мм и  $\varphi = 40^\circ$ ;  $\varphi_1 = 20^\circ$  при тех же условиях имеем увеличение расчетных неровностей с 11 мкм до 103 мкм, т.е. на 92 мкм. Значительно меньшее непосредственное влияние на высоту расчетных неровностей оказывают факторы  $h$ ,  $\epsilon$ ,  $R$ ,  $r$ .

Глубина резания  $t$  и скорость  $n$  косвенно воздействуют на формообразование. Степень влияния числа заходов на процесс формообразования может быть значительной, что определяется величиной  $K_n$ . Установлено прямое и доминирующее влияние  $K_n$  на весь процесс точения винтовым резцом. Соотношение  $K_n$  определяет геометрическое образование поверхности и неравномерность процесса, которая в связи с жесткостью системы СПИД определяет упругие деформации, а следовательно, и точность обработки. Значимость косвенного влияния любого из факторов на формообразование определяется его влиянием на скорость самовращения резца. На рис. 1 приведена зависимость величины погрешностей  $\Delta$ , включающих наибольшую высоту неровностей  $R_{\max}$  и величину огранки, от соотношения  $K_n$  при прочих равных условиях для различных значений подачи. Там же для сравнения приведены значения расчетных шероховатостей для призматического резца. Результаты имитационного моделирования полностью соответствуют данным натурального эксперимента.

Известно, что соотношение  $K_n$  при точении ВРР самоустанавливается в зависимости от условий резания и в первую очередь от  $\epsilon$ ,  $r$ ,  $R$ ,  $i$ ,  $h$ ,  $t$ ,  $s$ , характеристик обрабатываемого материала, вида охлаждения, подшипникового узла, износа, скорости резания, геометрии инструмента, а также от взаимодействий некоторых из перечисленных факторов. Поэтому изменение любого из них приводит к непостоянству  $K_n$ , что в свою очередь может значительно ухудшить качество обработанной по-

верхности. Однако, так как степень непосредственного влияния возмущений первичных факторов на процесс формообразования практически очень мала, изменения последних не приведут к сколько-нибудь существенным изменениям обработанной поверхности, если в результате их (факторов) совместного действия  $K_n$  останется постоянным. В этом заключается возможность и предпосылка управления процессом формообразования, а следовательно, и качеством обработанной поверхности путем поддержания  $K_n$  постоянным и равным оптимальному для заданных условий значению.

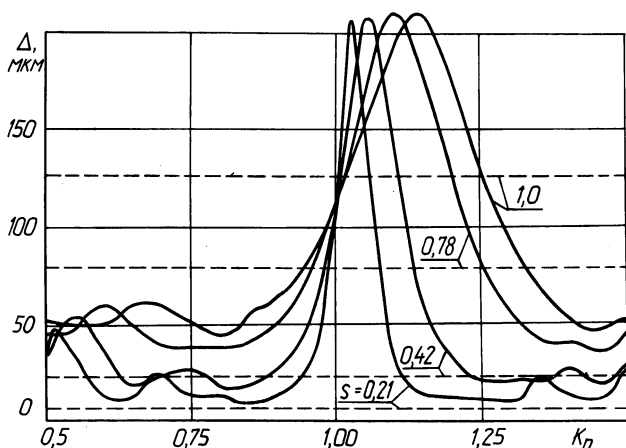


Рис. 1. Зависимость значения погрешностей от скорости самовращения реза.

Регулирующим параметром САУ качеством процесса формообразования винтовым ротационным резцом целесообразно принять угол  $\epsilon$  наклона оси реза ввиду простоты функциональной связи  $K_n = f(\epsilon)$  и удобства управления. Обратная связь осуществляется по  $K_n$ .

Высокие требования, предъявляемые к статическим и динамическим характеристикам системы управления, с одной стороны, и развитие микропроцессорной техники, приведшее к созданию надежных малогабаритных и дешевых технических средств, с другой – сделали целесообразным их использование в названной системе адаптивного управления.

САУ (рис. 2) содержит фотодатчики ФД1, ФД2 скорости вращения шпинделя и реза, включающие диски с отверстиями, и электронные схемы, вырабатывающие прямоугольные импульсы с частотой, пропорциональной скорости вращения, специальную ЭВМ и блок управления шаговым приводом. СЭВМ состоит: из двух

двух восьмиразрядных счетчиков СТ1 и СТ2; двух восьмиразрядных регистров Рг1 и Рг2; арифметическо-логического устройства АЛУ; схемы сравнения СС и устройства управления УУ. Импульсы с фотодатчиков ФД1 и ФД2 поступают на вход счетчиков СТ1 и СТ2. Время, в течение которого счетчики накапливают информацию, выбирается из соображений требуемой точности контроля величины  $K_n$ . Информация из счетчиков передается в регистры по сигналам У3 и У4, вырабатываемым одновременно. После этого по сигналам У1 и У2 счетчики "обнуляются" и производят следующее накопление импульсов, т. е. измерение скоростей. Информация из регистров Рг1 и Рг2 поступает в арифметическо-логическое устройство, которое управляется серией импульсов У5 и по-

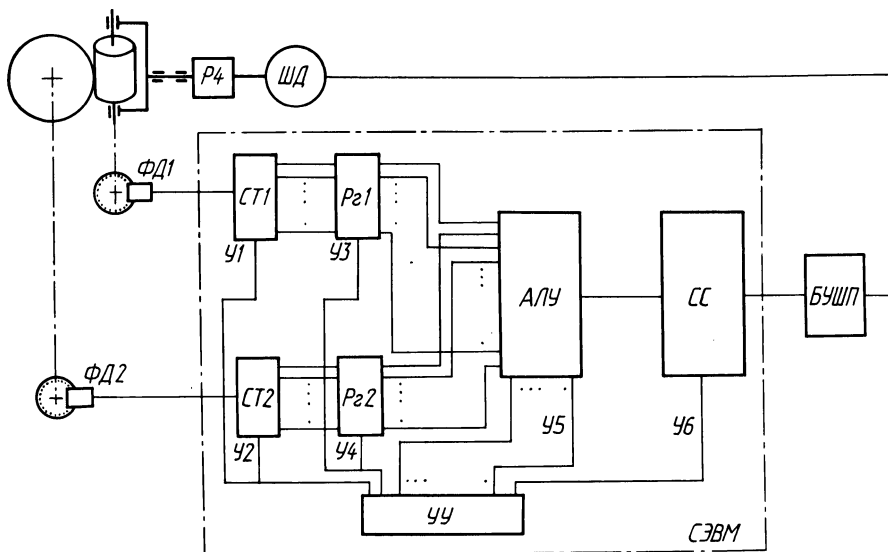


Рис. 2. Схема управления.

сле деления содержимого Рг1 на содержимое Рг2 выдает в схему сравнения измеренное значение  $K_n$ . опорное оптимальное значение  $K_n$  вводится в схему сравнения с помощью галетных переключателей, расположенных на пульте управления САУ. При наличии рассогласования схема сравнения вырабатывает соответствующие управляющие сигналы ("+" программа, "-" программа), которые по импульсу У6 поступают в БУШП-8 Г65.139.026 и приводят к соответствующему увеличению или уменьшению угла  $\epsilon$  в заданных пределах. В случае совпадения измеренного и опорного значений  $K_n$  схема сравнения вырабатывает "0" - привод выключен.

Привод состоит из шагового двигателя ШД-5Д1М-У3 и червячного редуктора РЧ. Предлагаемая система адаптивного управления при оптимизации  $K_{\Gamma}$  по критерию равномерности процесса может использоваться и при черновых операциях с недостаточной жесткостью системы СПИД. Таким образом, применение разработанной системы адаптивного управления расширяет эффективную область использования ВРР на чистовые операции, операции с обработкой поверхностей различных диаметров, а также на черновые операции с недостаточной жесткостью системы СПИД.

УДК 621.919

Н.И.Жигалко, канд. техн. наук (БПИ)

### РЕЖИМ ШЛИФОВАНИЯ, ЗАТОЧКИ И ДОВОДКИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ КОЛЕЦ - ЗУБЬЕВ СБОРНЫХ ПРОТЯЖЕК

Стабильное получение отверстий высокого качества точности (Н7-Н9) и малой шероховатости с Ra до 0,63-0,20 мкм в деталях из чугуна, сталей и цветных металлов может быть обеспечено протяжками с дополнительными выглаживающими, или дефор-

мирующими, зубьями. При этом более высокую стойкость имеют твердосплавные протяжки по сравнению с быстрорежущими. Для обработки чугуна и цветных сплавов протяжки оснащаются твердыми вольфрамокобальтовыми сплавами ВК6М, ВК15М, ВК100М и др., а для сталей - вольфрамотитанокобальтовыми Т5К12В, Т14К8 и титанотанталовыми ТТ7К12 сплавами.

Для обработки отверстий высоких квалитетов точности и малой шероховатости зубья протяжек должны быть изготовлены точнее на один-два квалитета и иметь меньшую шероховатость поверхности, чем обрабатываемое отверстие. Сопрягаемые поверхности всех деталей сборных протяжек должны изготавливаться по 6-7-му квалитетам точности и иметь шероховатость с Ra до 0,08-0,04 мкм, что обеспечивается чистовым алмазным шлифованием и окончательной заточкой, а также тщательной доводкой.

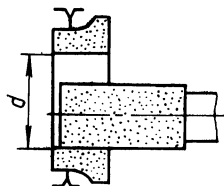
Применяемая твердосплавная протяжка представляет собой сборную конструкцию, в которой на длинную базовую стальную оправку насаживаются режущие, калибрующие и деформирующие кольца-зубья. Между зубьями для образования стружечных каналов имеются стальные промежуточные втулки. Кроме того, на базовой оправке в соответствующих местах имеются передняя, сред-

Таблица 1

Технологический процесс изготовления твердосплавных режущих и калибрующих

Операция	Эскиз обработки	Тип и модель станка	Приспособление
1	2	3	4

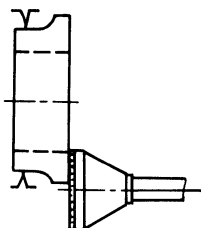
1. а) Шлифовать внутренний диаметр отверстия



Универсально-шлифовальный станок 3А228

Трехкулачковый патрон

б) первый торец режущего зубья кольца



зубьев-колец

Форма и характеристика круга	Режимы обработки				
	$v_k, \text{м/с}$	$s_{\text{пр}}, \text{м/мин}$	$s_{\text{поп}}, \text{мм/дв.ход}$	$v_{\text{дет}}, \text{м/мин}$	$t, \text{мм}$
5	6	7	8	9	10

АПП АСО 10-15 0,5-1,0 - 10-20 0,007-0,01  
10  
Б1-100

АЧК АСО 15-20 - - - -  
10  
Б1 100