

## ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ЗАКРЫТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ

*Канд. техн. наук, доц. КАШТАЛЬЯН И. А.*

*Белорусский национальный технический университет*

Программное управление металлорежущим оборудованием – одно из важнейших направлений развития научно-технического прогресса в машиностроении. Эффективность использования станков с числовым программным управлением (ЧПУ) в значительной степени зависит от функциональных возможностей устройства управления. Мощным средством повышения функциональности устройства ЧПУ являются постоянные циклы и готовые формы. На станках с ЧПУ токарной группы нашли применение постоянные циклы нарезания резьбы, многопроходной обработки открытых и полуоткрытых зон выборки, готовые формы для обработки стандартных канавок (например, канавок для выхода шлифовального круга). Использование указанных циклов и готовых форм существенно повышает эффективность токарных станков с ЧПУ. Однако для некоторых закрытых поверхностей вращения (проточки, желоба, канавки лабиринтного уплотнения и др.) применяемые на практике схемы обработки и макроопределения для их реализации имеют ряд недостатков [1, 2], например низкую стойкость режущего инструмента; значительные затраты машинного времени на выполнение дополнительных чистовых проходов; затрудненный процесс образования и отвода стружки, что ведет к повышению сил и мощности резания. Сведение к минимуму указанных недостатков может быть достигнуто путем использования новых схем обработки и построения на их основе циклов с новой структурой. В этом плане наибольший интерес представляют предложенные схемы обработки закрытых поверхностей вращения «в развод» [3].

Для обработки «в развод» узких канавок (например, канавок лабиринтного уплотнения)

предложена схема, представленная на рис. 1а. Прорезному резцу с длиной главной режущей кромки  $B$ , настроенными точками  $C$ ,  $D$  наряду с поперечной подачей (перемещение в направлении, перпендикулярном главной режущей кромке) через оборот заготовки сообщается знакопеременное дополнительное перемещение в основной плоскости перпендикулярно вектору поперечной подачи, а ширина главной режущей кромки принимается меньше ширины протачиваемой канавки на величину этого перемещения. На схеме начало обработки совпало с поперечной подачей. Далее резцу дополнительно в течение следующего оборота заготовки сообщается перемещение перпендикулярно вектору поперечной подачи вправо на величину  $L_z$ , которая выбирается в зависимости от поперечной усадки стружки. При перемещении резца припуск снимается главной режущей и правой вспомогательной кромками. Между левой вспомогательной режущей кромкой и левой стороной проточки образуется зазор, который растет от нуля до величины дополнительного перемещения. В течение следующего оборота резец получает только поперечную подачу. При этом происходит исправление положения правой боковой поверхности канавки за счет удаления правой вспомогательной режущей кромкой слоя металла, определяемого величиной дополнительного перемещения  $L_z$ . Когда резец перемещается влево (очередной оборот заготовки), рабочими являются главная и левая вспомогательная режущие кромки. Перемещение только с поперечной подачей в течение следующего оборота ведет к исправлению положения левой боковой поверхности канавки. Указанные перемещения повторяются до полного образования канавки

по глубине. Окончательное формирование канавки происходит при перемещении резца в направлении, перпендикулярном поперечной подаче, на величину дополнительного перемещения  $L_z$ .

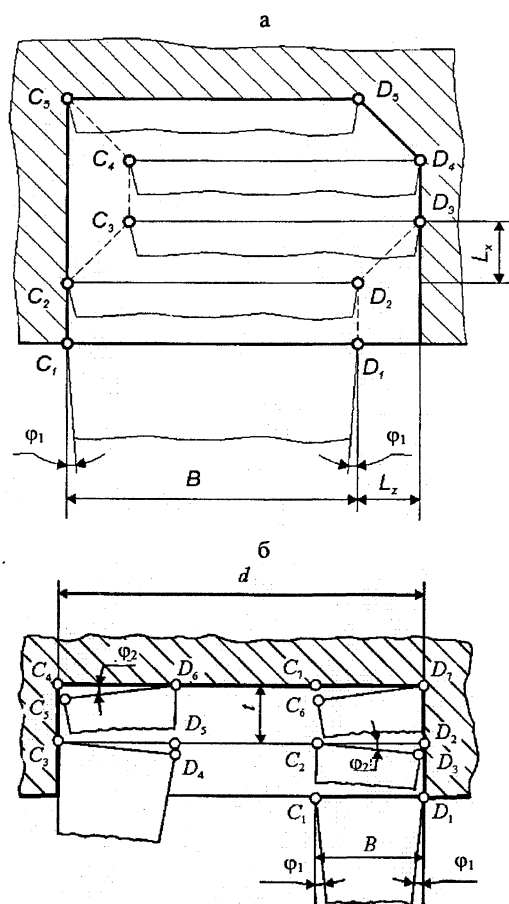


Рис. 1. Схемы обработки «в развод»: а – узких канавок; б – широких канавок, проточек и желобов

Широкие канавки, проточки и желоба предложено обрабатывать по схеме, представленной на рис. 1б. Прорезному резцу с длиной главной режущей кромки  $B$ , настроенными точками  $C$ ,  $D$  и вспомогательными углами в плане  $\phi_1$  сообщается перемещение (врезание) на глубину  $t$  с подачей  $S_1$ . Далее резец разворачивается относительно неподвижной точки  $C$  так, что между главной режущей кромкой и направлением, перпендикулярным боковой поверхности канавки, образуется угол  $\phi_2$  (всегда  $\phi_2 \leq \phi_1$ ). После разворота резцу сообщается продольная подача со скоростью  $S_2$  в направлении боковой поверхности канавки. Резец работает как проходной с углами в плане – главным  $\phi = 90^\circ +$

$+\phi_1 - \phi_2$  и вспомогательным  $\phi_2$ . Когда настроенная точка  $C$  будет находиться в крайнем левом положении (совмещена с линией контура левой боковой поверхности канавки), осуществляются разворот резца относительно неподвижной точки  $C$  в исходное положение ( $\phi_2 = 0$ ) и последующее врезание на глубину  $t$ . Затем резец разворачивается с образованием угла  $\phi_2$  относительно неподвижной точки  $D$  и осуществляется продольная подача в направлении правой боковой поверхности канавки. После завершения этого перемещения резец разворачивается в исходное положение для очередного врезания. Такие движения повторяются до полного формообразования канавки по глубине.

На шероховатость поверхности, обработанной резанием, оказывает влияние множество причин, которые объединяются в три основные группы [4]. К первой группе относятся причины, связанные с геометрией процесса резания, ко второй – связанные с упругой и пластической деформацией обрабатываемого материала. Наконец, третью группу составляют причины, связанные с возникновением вибраций в процессе резания, которые приводят к отклонению действительной траектории движения обрабатываемой заготовки и инструмента от заданной. Вибрации, упругие и пластические деформации обрабатываемого материала нарушают закономерное распределение неровностей на поверхности, искажают их форму, существенно увеличивают их высоту.

В зависимости от схемы обработки преобладают причины, входящие в состав той или иной группы. При точении по схеме, представленной на рис. 1а, на форму и относительное расположение неровностей на боковых поверхностях канавки главным образом оказывают влияние причины, которые относятся к первой группе. Это касается подачи на оборот заготовки  $S_2$ , а также таких геометрических параметров режущей части прорезного резца, как вспомогательные углы в плане  $\phi_1$  и радиусы при вершинах резца  $\rho$ .

При обработке канавки по схеме, представленной на рис. 1а, на ее боковых поверхностях образуются гребешки с шагом, равным  $4S_0$ . Расчетная высота такого гребешка  $Rz_p$  опреде-

ляется как разность между значениями радиуса при вершине резца  $\rho$  и аппликаты  $z$  точки пересечения дуги радиуса  $\rho$  с касательной к такой же дуге при смещении вершины резца на величину  $a = 4S_0$  (рис. 2)

$$Rz_p = \rho - z. \quad (1)$$

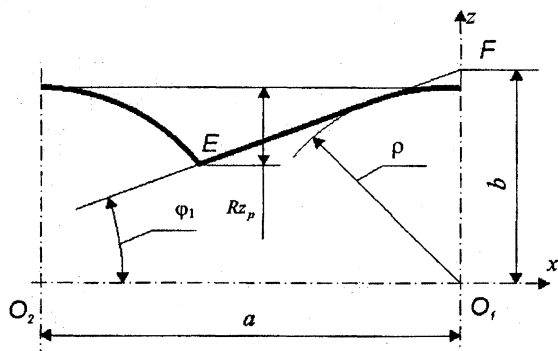


Рис. 2. Расчетная схема для определения высоты микронеровностей

Значение аппликаты  $z$  можно определить из системы уравнений, состоящей из уравнения касательной  $EF$  и уравнения окружности радиусом  $\rho$  с центром в точке  $O_1$ :

$$\begin{cases} z = kx + b, \\ z^2 = \rho^2 - (x + a)^2. \end{cases} \quad (2)$$

Решив данную систему уравнений, получим

$$z = \frac{b - ak + \sqrt{(\rho^2 - a^2)k^4 + 2abk^3 + (\rho^2 - b^2)k^2}}{1 + k^2}. \quad (3)$$

После замены в (3) параметров  $a, b, k$  их значениями из выражений:  $a = 4S_0$ ;  $b = \rho / \cos \varphi_1$ ;  $k = \tan \varphi_1$  и преобразований имеем

$$z = \rho \cos \varphi_1 - 4 \sin \varphi_1 \times \left[ S_0 \cos \varphi_1 - \sqrt{S_0 \sin \varphi_1 \left( \frac{\rho}{2} - S_0 \sin \varphi_1 \right)} \right]. \quad (4)$$

Подставив в (1) значение  $z$  из (4), получим зависимость для определения  $Rz_p$

$$Rz_p = \rho(1 - \cos \varphi_1) + 4 \sin \varphi_1 \times \left[ S_0 \cos \varphi_1 - \sqrt{S_0 \sin \varphi_1 \left( \frac{\rho}{2} - S_0 \sin \varphi_1 \right)} \right]. \quad (5)$$

Формы и размеры гребешков на боковых поверхностях широких канавок, проточек и желобов (рис. 1б) зависят от подачи  $S_0$  при врезании резца на глубину  $t$  и геометрических параметров его режущей части (угла  $\varphi_1$  и радиуса при вершине  $\rho$ ). Шаг гребешков при этом равен подаче на оборот  $S_0$ , которая определяется из соотношения  $S_0 = S_1 / n$ , где  $n$  – частота вращения заготовки. Расчетная высота  $Rz_p$  находится из уравнения

$$Rz_p = \rho(1 - \cos \varphi_1) + \sin \varphi_1 \left[ S_0 \cos \varphi_1 - \sqrt{S_0 \sin \varphi_1 (2\rho - S_0 \sin \varphi_1)} \right]. \quad (6)$$

Зависимость (6) получена аналогично (5).

Реальные неровности  $Rz$  по форме и высоте отличаются от расчетных  $Rz_p$ . Как правило, реальный микропрофиль теряет свою регулярность, кроме того, всегда  $Rz > Rz_p$ . Это обусловлено рядом причин, среди которых можно выделить пластическое течение материала из зоны первичной деформации в сторону вершин микронеровностей; трение задних поверхностей инструмента о поверхность резания; неровности лезвий инструмента и др.

Экспериментальная проверка влияния подачи и геометрических параметров режущей части резца на шероховатость боковых поверхностей канавок проводилась с использованием токарного станка с ЧПУ мод. 1А751Ф3. Обработывались канавки на наружных цилиндрических и торцовых поверхностях заготовки из стали 40Х. Заготовки диаметром 220 мм и длиной 115 мм крепились в трехкулачковом патроне. Скорость резания поддерживалась постоянной (86 м/мин). Обработка велась прорезным резцом с напаянной режущей пластиной из твердого сплава Т5К10. Геометрические параметры режущей части:  $\alpha = 8^\circ$ ;  $\gamma = 8^\circ$ ;  $\varphi_1 = 2^\circ$ ;  $\rho = 0,3$  мм. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости применялась эмульсия.

При оценке шероховатости поверхности форму и размеры микронеровностей измеряют в направлении движения резания (продольная шероховатость) и в направлении, перпендикулярном этому движению (поперечная шерохо-

ватость) [4]. Запись микронеровностей в поперечном направлении производилась на профилографе-профилометре мод. 211. Для измерения шероховатости в продольном направлении использовался прибор Tolygond (Англия). На рис. 3 представлены профилограммы боковых поверхностей канавок, обработанных на наружной цилиндрической поверхности заготовки. Круглограммы боковых поверхностей канавок, обработанных на торце заготовки, приведены на рис. 4. Зависимости параметра шероховатости  $Ra$  от величины подачи на оборот при обработке канавок обычным методом (подача только в направлении, перпендикулярном главной режущей кромке) и «в развод» представлены на рис. 5. Графики строились по средним значениям, полученным в результате обработки десяти профилограмм. Интервальная оценка среднего, а также сравнение дисперсий и средних производились согласно [5].

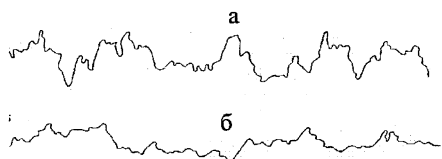


Рис. 3. Профилограммы боковых поверхностей канавок, обработанных прорезным резцом ( $B = 10$  мм;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $\gamma = 8^\circ$ ;  $\varphi = 2^\circ$ ;  $\rho = 0,3$  мм) с подачей  $S_0 = 0,12$  мм/об: а –  $L_z = 0$  ( $R_z = 13,2$  мкм); б –  $L_z = 0,4$  мм ( $R_z = 7,3$  мкм)

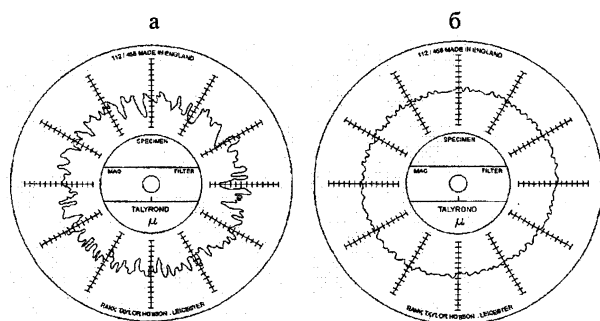


Рис. 4. Круглограммы боковых поверхностей торцовых канавок, обработанных прорезным резцом ( $B = 10$  мм;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $\gamma = 8^\circ$ ;  $\varphi = 2^\circ$ ;  $\rho = 0,3$  мм); с подачей  $S_0 = 0,12$  мм/об: а –  $L_z = 0$ ; б –  $L_z = 0,4$  мм

Из графиков видно, что для всех значений подач высота микронеровностей боковых поверхностей значительно выше для канавок, обработанных обычным методом. Это явление можно объяснить следующим образом.

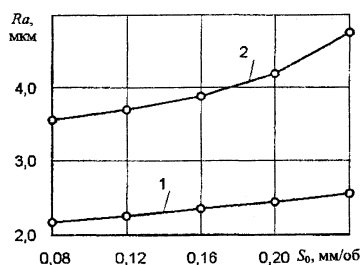


Рис. 5. Зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от подачи на оборот  $S_0$  при точении канавок прорезным резцом: 1 – «в развод»; 2 – обычным методом

В процессе усадки стружки происходит увеличение ее ширины. В результате при точении прорезным резцом с подачей только в направлении, перпендикулярном главной режущей кромке, увеличенная по ширине стружка, периодически защемляясь, при выходе царапает боковые стороны канавки. Шероховатость образованных при этом поверхностей существенно возрастает. Уменьшение параметров шероховатости при точении канавок «в развод» обусловлено улучшением отвода стружки из зоны резания (исключается ее защемление). Установлено также уменьшение параметра  $Ra$  при точении широких канавок по схеме, представленной на рис. 16. Данное явление можно объяснить следующим образом. В соответствии с циклом формообразования канавки (проточки или желоба) резец с развернутой главной режущей кромкой на угол  $\varphi_2$  перемещается в направлении боковой поверхности канавки со скоростью подачи  $S_2$ . При этом кинематический угол  $\varphi_1$  режущего лезвия меньше статического на величину угла  $\varphi_2$ . После завершения данного перемещения производится разворот главной режущей кромки резца в исходное положение ( $\varphi_2 = 0$ ) для очередного врезания на глубину  $t$ . Поскольку время разворота главной режущей кромки соизмеримо с временем оборота заготовки, резец вспомогательной режущей кромкой частично срезает вершины образованных ранее микронеровностей, величина которых ввиду пластической и упругой деформаций в зоне резания всегда значительно больше величины, определяемой только подачей и геометрией режущего клина. Время разворота главной режущей кромки определяется скоростью подачи  $S_2$  и конструктивными параметрами резца [3]. С уменьшением разности в значениях углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  эффект уменьшения вы-

соты микронеровностей становится более заметным.

При сопряжении деталей машин их соприкосновение происходит по реальным, шероховатым поверхностям. Фактическая площадь контакта при этом влияет на многие эксплуатационные качества поверхности (контактную жесткость, износостойкость и др.) и определяется с помощью кривой опорной поверхности Аббота-Файерстона [6]. На рис. 6 представлены кривые опорных поверхностей канавок, обработанных обычным методом и «в развод». Кривые построены по профилограммам поверхностей, обработанных с подачей 0,16 мм/об. Из рисунка видно, что для канавок, обработанных «в развод», кривая опорной поверхности является более пологой. Такая поверхность будет иметь эксплуатационные качества лучшие, чем поверхность, обработанная обычным методом.

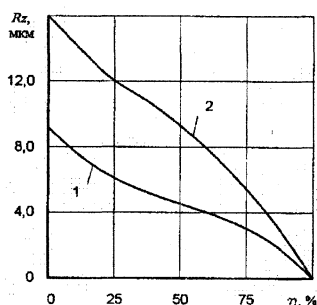


Рис. 6. Кривые опорных поверхностей: 1 – обработка «в развод»; 2 – обработка обычным методом

Экспериментальная проверка влияния геометрических параметров прорезного резца (угла в плане  $\varphi_1$  и радиуса при вершине резца  $\rho$ ) на шероховатость боковых поверхностей канавки проводилось при обработке с подачей  $S_0 = 0,16$  мм/об. Дополнительное перемещение  $L_z$  резца равно 0,4 мм. Шероховатость оценивалась по параметру  $Rz$ . В результате установлено, что наибольшее влияние на величину  $Rz$  оказывает угол в плане  $\varphi_1$ . Радиус при вершине резца  $\rho$  влияет на шероховатость в меньшей степени. В результате экспериментов также установлено, что величина перемещения  $L_z$  в пределах от 0,3 до 0,5 мм на шероховатость

влияния не оказывает и может назначаться только из условия свободного схода стружки.

## ВЫВОДЫ

Шероховатость боковых поверхностей канавок при точении «в развод» уменьшается более чем в 1,5 раза по сравнению с обычной обработкой. Величина дополнительного перемещения  $L_z$  на шероховатость влияния практически не оказывает и может назначаться только из условия свободного схода стружки. Включение в цикл обработки проточек и желобов рабочего движения с продольной подачей и предварительным разворотом главной режущей кромки на угол  $\varphi_2$  ведет к снижению шероховатости обработанных поверхностей за счет уменьшения действительного угла в плане  $\varphi_1$ . Путем коррекции перемещения в направлении продольной подачи и угла  $\varphi_2$  появляется возможность управлять процессом формообразования закрытых поверхностей вращения с повышенными требованиями по шероховатости и точности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гжиров, Р. И. Программирование обработки на станках с ЧПУ: справ. / Р. И. Гжиров, П. П. Серебренников. – Л.: Машиностроение, 1990. – 588 с.
2. Каштальян, И. А. Обработка на станках с числовым программным управлением / И. А. Каштальян, В. И. Клевзович. – Минск: Вышэйш. шк., 1989. – 271 с.
3. Каштальян, И. А. Макроопределения для формообразования закрытых элементов контура детали на токарных станках с ЧПУ / И. А. Каштальян // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – № 1. – С. 51–55.
4. Маталин, А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
5. Пустыльник, Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
6. Маталин, А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А. А. Маталин. – Киев: Техника, 1971. – 144 с.

Поступила 30.03.2005