

УДК 621.9.042

Д. Г. Шатуров

ФОРМИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВАЛОВ ПРИ ТОЧЕНИИ ЧАШЕЧНЫМ РЕЗЦОМ С МИКРООБНОВЛЯЕМОЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ

Рассмотрено влияние параметров режима обработки на формирование шероховатости поверхностей валов при многократном микрообновлении круговой режущей кромки. Приведены аналитическая зависимость, уравнение регрессии для определения величины шероховатости и способ обеспечения её постоянной величины для многопроходного резца.

Эксплуатационные характеристики поверхностей деталей машин зависят от качества слоя, формируемого при чистовых и финишных технологических операциях. Одним из основных критериев определения параметров качества является величина шероховатости обработанной поверхности. Как показывают известные исследования [1], процесс резания резцом с непрерывно и принудительно микрообновляемой режущей кромкой (МОРК) является чистовым технологическим процессом, обеспечивающим на оптимальных режимах среднеарифметическое отклонение микропрофиля по параметру R_a в пределах 0,8...1,2 мкм, не изменяющееся за определённый промежуток времени работы резца. В силу этого он является альтернативой процессу шлифования не только по качеству обработанной поверхности, но и по энергоёмкости [2].

Однако остаётся открытым вопрос о величине шероховатости поверхности, получаемой при многократном микрообновлении круговой режущей кромки, когда полностью используются режущие свойства лезвия, а его износ достигает оптимальной величины.

Теоретическую высоту R_z микронеровностей при обработке чашечным резцом с микрообновляемой режущей кромкой находим из схемы, представленной на рис. 1:

$$R_z = R_{z1} + R_{z2} + R_{z3}, \quad (1)$$

где R_{z1} , R_{z2} , R_{z3} – соответственно высоты микронеровностей, обусловленные двумя соседними положениями круговой режущей кромки, отстоящими в направлении подачи на величину подачи, размерным износом лезвия и упругой составляющей деформации обрабатываемого металла.

$$R_{z1} = \frac{S^2}{8r_N}, \quad (2)$$

где r_N – радиус режущей кромки резца; S – величина подачи.

Величину R_{z2} находим из схемы (рис. 1) следующим образом:

$$R_{z2} = h_{NM} \frac{\psi_1}{\psi + \psi_1} \cdot \operatorname{tg} \alpha_3 \cdot \cos \psi_1, \quad (3)$$

где

$$h_{NM} = h_{IM} \left[N^{n_0+1} - (N-1)^{n_0+1} \right];$$

$$h_{IM} = \frac{\delta_0}{T_0^{n_0}} \cdot \tau_M^{n_0} \cdot K_p;$$

$$\sin \psi_1 = \frac{S}{2r_N};$$

$$\cos \psi = 1 - \frac{t}{r_N};$$

$$r_N = r - h_{NM} \cdot \operatorname{tg} \alpha_3 = r - \delta_{pN},$$

где α_3 – задний угол заточки резца; N – число оборотов режущей кромки (РК); T_0 – стойкость резца с неподвижной РК;

δ_0 – оптимальный износ лезвия; τ_M – время нахождения точки РК в зоне обработки; h_{1M}, h_{NM} – износ задней

поверхности резца после первого и N-го проходов соответственно; r_N – радиус режущей кромки после N-го прохода.

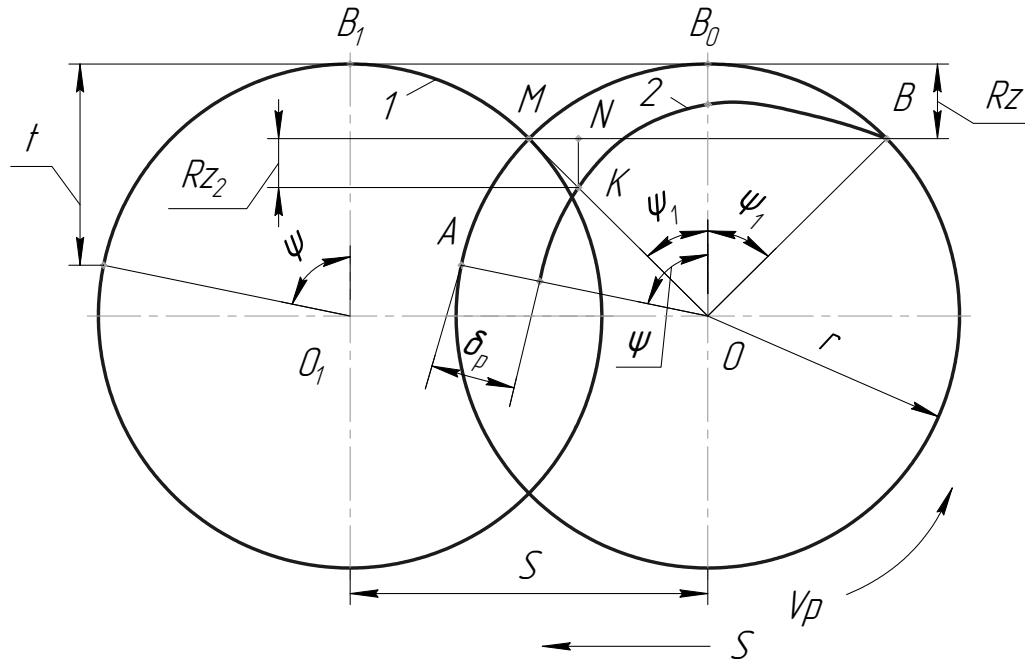


Рис. 1. Схема для расчёта микронеровностей при обработке чашечным резцом с микрообновляемой режущей кромкой: 1 – неизношенная режущая кромка; 2 – режущая кромка, имеющая максимальный радиальный износ на выходе из зоны резания δ_p ; S – подача; V_p – скорость микрообновления РК; t – глубина резания

После преобразований получим

$$R_{z2} = h_{NM} \frac{\psi_1}{\psi + \psi_1} \cdot \left(1 - \frac{S^2}{8r_N^2} \right) \operatorname{tg} \alpha_3 \cdot \quad (4)$$

Упругую составляющую высоты микронеровности находим из [4]:

$$R_{z3} = 2,4 \cdot R_{np} \cdot (1 - \mu^2) \cdot \left(\frac{HB}{E} \right)^2, \quad (5)$$

где R_{np} – приведенный радиус контактирующих тел; μ – коэффициент Пуассона, $\mu = 0,3$; HB – твёрдость по Бринеллю; E – модуль упругости, $E = 2 \cdot 10^6$ кг/см² (для стали) [5].

$$2R_{np} = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{A}{B}} ;$$

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{R_3} \right);$$

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{21}} - \frac{1}{R_{22}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_3} \right),$$

где ρ – радиус округления режущей кромки; R_3 – радиус обрабатываемой заготовки.

Приняв для простоты $R_3 = \infty$, получим

$$R_{np} = \rho \sqrt{\frac{r}{\rho}} = \sqrt{r\rho}.$$

Тогда

$$R_{z3} = 2,4 \cdot \sqrt{r\rho} \cdot (1 - \mu^2)^2 \cdot \left(\frac{HB}{E} \right)^2. \quad (6)$$

Так, например, при обработке стали 45 твёрдостью HB = 200; $\mu = 0,3$; $E = 2 \cdot 10^6$ кг/см² резцом с $r = 23$ мм; $\rho = 30$ мкм имеем

$$R_{z3} = 2,4 \cdot \sqrt{\frac{23 \cdot 30}{1000}} \cdot (1 - 0,3^2)^2 \times \\ \times \left(\frac{200 \cdot 10^2}{2 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot 1000 \approx 0,17 \text{ мкм.}$$

Окончательно можно записать следующее:

$$R_z = \frac{S^2}{8r} + h_{NM} \frac{\psi_1}{\psi + \psi_1} \cdot \left(1 - \frac{S^2}{8r_N^2} \right) \text{tg} \alpha_3 + \\ + 2,4 \cdot \sqrt{r\rho} \cdot (1 - \mu^2)^2 \cdot \left(\frac{HB}{E} \right)^2. \quad (7)$$

$$R_a = 0,2R_z.$$

Исследуя зависимость (7), можно убедиться, что величина шероховатости поверхности зависит от величины подачи S , глубины резания t и износа h_{NM} РК, который изменяется в зависимости от принятых режимов обработки.

Для установления их влияния на качество поверхности были проведены исследования при однофакторном планировании эксперимента, когда все факторы, кроме одного, оставались постоянными. Результаты исследования представлены на рис. 2.

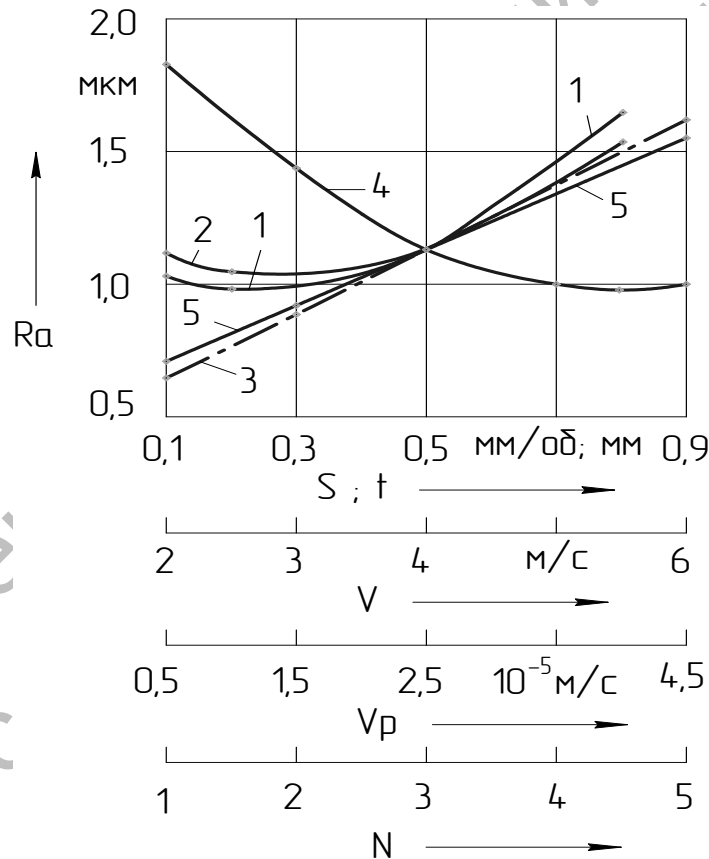


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности от режимов резания: подачи S (1), глубины резания t (2), скорости резания V (3), скорости перемещения режущей кромки V_p (4) и числа оборотов режущей кромки N (5) (материал – сталь 45; $S = 0,5$ мм/об; $t = 0,5$ мм; $V = 4$ м/с; $V_p = 2,5 \cdot 10^{-5}$ м/с; $N = 3$; $r = 23$)

Как видно из рис. 2, зависимости шероховатости от подачи S и глубины резания t изменяются по параболическому

закону и имеют экстремальные точки. При этом при прямом сечении среза шероховатость поверхности всегда

меньше, чем при обратном. А большей подаче S , по сравнению с глубиной t сечения среза, соответствует и большая величина шероховатости R_a . И наоборот, большей глубине t сечения среза, по сравнению с величиной подачи S , соответствует меньшая величина шероховатости R_a (рис. 2). Так, увеличение подачи S от 0,2 до 0,8 мм/об увеличивает величину шероховатости R_a в 1,65 раза, аналогичное увеличение глубины t резания от 0,2 до 0,8 мм увеличивает шероховатость в 1,4 раза (см. рис. 2). Увеличение скорости резания от 2 до 6 м/с и числа N проходов режущей кромки зоны резания от одного до пяти раз приводит к увеличению величины R_a соответственно от 0,67 до 1,6 мкм и от 0,75 до 1,55 мкм, т. е. в 2,4 и 2,0 раза, что связано с размерным износом лезвия [1]. Увеличение скорости V_p перемещения РК приводит к уменьшению времени нахождения точки РК в зоне обработки и, соответственно, к её износу, что сказывается на уменьшении по параболической зависимости величины R_a от 1,82 до 0,97 мкм при увеличении скорости V_p от $0,5 \cdot 10^5$ до $4,5 \cdot 10^5$ м/с, т. е. в 1,9 раза. Несовпадение экспериментальных и расчётных величин шероховатости поверхности составляет менее 15 %.

Для более детального установления влияния каждого параметра режима обработки на величину R_a и в связи с тем, что при проведении однофакторных экспериментов установлена нелинейная связь величины шероховатости R_a от подачи, глубины резания и скорости перемещения РК, возникла необхо-

димость в построении математической модели процесса с использованием математического метода планирования экспериментов. Для математического описания объектов исследования с доверительной вероятностью $P_d = 0,95$ использовался метод планирования второго порядка – ротатабельный план Бокса [7] при числе исследуемых факторов $K = 5$, уравнение регрессии которого имеет вид:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq K} b_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq K} b_{ij} X_i X_j + \sum_{1 \leq i \leq K} b_{ij} X_i^2 \quad (8)$$

В табл. 1 представлены пределы изменения именованных факторов, интервалы и уровни их варьирования.

При составлении матрицы планирования экспериментов учитывают кодированное значение факторов с использованием формулы [7]

$$X_i = \frac{C_i - C_{0i}}{\varepsilon_i} \quad (9)$$

где C_i , C_{0i} – натуральное значение фактора, соответственно его текущее значение и значение на нулевом уровне; X_i – кодированное значение фактора; ε_i – натуральное значение интервала варьирования.

С использованием табл. 1 построена матрица планирования и рабочая матрица (табл. 2), которая использовалась для экспериментов. Результаты экспериментов записаны в столбце 11.

Табл. 1. Пределы изменения, интервалы и уровни варьирования факторов

Фактор	Предел изменения	Интервал варьирования ε_i	Уровень варьирования				
			-2	-1	0	1	2
Подача S , мм/об (X_1)	0,2...0,8	0,15	0,2	0,35	0,5	0,65	0,8
Глубина резания t , мм (X_2)	0,2...0,8	0,15	0,2	0,35	0,5	0,65	0,8
Скорость резания V , м/с (X_3)	2...6	1	2	3	4	5	6
Скорость перемещения режущей кромки V_p , м/с (X_4)	$\frac{0,5}{10^5} \dots \frac{4,5}{10^5}$	$\frac{1}{10^5}$	$\frac{0,5}{10^5}$	$\frac{1,5}{10^5}$	$\frac{2,5}{10^5}$	$\frac{3,5}{10^5}$	$\frac{4,5}{10^5}$
Число проходов N (X_5)	1...5	1	1	2	3	4	5

Табл. 2. Матрица планирования, рабочая матрица и результаты экспериментов

Матрица планирования					Рабочая матрица					Результаты		
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	S, мм/об	t, мм	V, м/с	V _p ·10 ⁵ , м/с	N	(y _n)	(ŷ _n)	(y _n - ŷ _n) ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
+	+	+	+	+	0,65	0,65	5	3,5	4	1,77	1,74	9·10 ⁻⁴
-	+	+	+	-	0,35	0,65	5	3,5	2	1,08	1,03	25·10 ⁻⁴
+	-	+	+	-	0,65	0,35	5	3,5	2	1,13	1,1	9·10 ⁻⁴
-	-	+	+	+	0,35	0,35	5	3,5	4	1,2	1,18	4·10 ⁻⁴
+	+	-	+	-	0,65	0,65	3	3,5	2	0,92	0,88	16·10 ⁻⁴
-	+	-	+	+	0,35	0,65	3	3,5	4	0,99	0,97	4·10 ⁻⁴
+	-	-	+	+	0,65	0,35	3	3,5	4	1,06	1,04	4·10 ⁻⁴
-	-	-	+	-	0,35	0,35	3	3,5	2	0,4	0,33	49·10 ⁻⁴
+	+	+	-	-	0,65	0,65	5	1,5	2	1,83	1,8	9·10 ⁻⁴
-	+	+	-	+	0,35	0,65	5	1,5	4	1,9	1,9	0
+	-	+	-	+	0,65	0,35	5	1,5	4	1,97	1,96	1·10 ⁻⁴
-	-	+	-	-	0,35	0,35	5	1,5	2	1,26	1,24	4·10 ⁻⁴
+	+	-	-	+	0,65	0,65	3	1,5	4	1,74	1,74	0
-	+	-	-	-	0,35	0,65	3	1,5	2	1,05	1,03	4·10 ⁻⁴
+	-	-	-	-	0,65	0,35	3	1,5	2	1,12	1,11	1·10 ⁻⁴
-	-	-	-	+	0,35	0,35	3	1,5	4	1,19	1,18	1·10 ⁻⁴
-2	0	0	0	0	0,2	0,5	4	2,5	3	1,0	0,99	1·10 ⁻⁴
-2	0	0	0	0	0,8	0,5	4	2,5	3	1,64	1,6	16·10 ⁻⁴
0	-2	0	0	0	0,5	0,2	4	2,5	3	1,06	1,03	9·10 ⁻⁴
0	-2	0	0	0	0,5	0,8	4	2,5	3	1,55	1,52	9·10 ⁻⁴
0	0	-2	0	0	0,5	0,5	2	2,5	3	0,66	0,67	1·10 ⁻⁴
0	0	-2	0	0	0,5	0,5	6	2,5	3	1,6	1,59	1·10 ⁻⁴
0	0	0	-2	0	0,5	0,5	4	0,5	3	1,83	1,81	4·10 ⁻⁴
0	0	0	-2	0	0,5	0,5	4	4,5	3	0,93	0,89	16·10 ⁻⁴
0	0	0	0	-2	0,5	0,5	4	2,5	1	0,75	0,75	0
0	0	0	0	-2	0,5	0,5	4	2,5	5	1,51	1,53	4·10 ⁻⁴
0	0	0	0	0	0,5	0,5	4	2,5	3	1,16	1,13	9·10 ⁻⁴
0	0	0	0	0	0,5	0,5	4	2,5	3	1,1	1,13	9·10 ⁻⁴
0	0	0	0	0	0,5	0,5	4	2,5	3	1,08	1,13	25·10 ⁻⁴
0	0	0	0	0	0,5	0,5	4	2,5	3	1,18	1,13	25·10 ⁻⁴
0	0	0	0	0	0,5	0,5	4	2,5	3	1,17	1,13	16·10 ⁻⁴
0	0	0	0	0	0,5	0,5	4	2,5	3	1,09	1,13	16·10 ⁻⁴
Σ												301·10 ⁻⁴

При ротатабельном планировании второго порядка для случая, когда $K = 5$, применялись следующие формулы для определения коэффициентов регрессии (8) [7]:

$$b_0 = 0,1591 \sum_1^{N_0} y_u - 0,0341 \sum_1^K \sum_1^{N_0} X_i y_u;$$

$$b_i = 0,0417 \sum_1^{N_0} X_i y_u;$$

$$b_{ij} = 0,0625 \sum_1^{N_0} X_i X_j y_u;$$

$$b_{ii} = 0,0312 \sum_1^{N_0} X_i y_u + 0,00028 \sum_1^K \sum_1^{N_0} X_i^2 y_u - 0,0341 \sum_1^{N_0} y_u,$$

где K – число факторов, $K = 5$; N_0 – число опытов, $N_0 = 32$ (см. табл. 2).

Обработка экспериментальных данных (см. табл. 2), согласно ротатабельному плану Бокса, позволила получить коэффициенты уравнения (8), и оно приняло вид:

$$y = 1,13 + 0,156X_1 + 0,122X_2 + 0,23X_3 - 0,23X_4 + 0,2X_5 + 6,25 \cdot 10^{-4} X_1 X_2 + 3,125 \cdot 10^{-3} X_1 X_3 - 3,125 \cdot 10^{-3} X_1 X_4 + 3,125 \cdot 10^{-3} X_1 X_5 + 5,625 \cdot 10^{-3} X_2 X_3 - 6,25 \cdot 10^{-3} X_2 X_4 + 6,25 \cdot 10^{-4} X_2 X_5 - 3,125 \cdot 10^{-4} X_3 X_4 + 3,125 \cdot 10^{-3} X_3 X_5 - 3,125 \cdot 10^{-3} X_4 X_5 + 0,04X_1^2 + 0,0364X_2^2 - 7,24 \cdot 10^{-3} X_3^2 + 0,055X_4^2 - 7,24 \cdot 10^{-3} X_5^2. \quad (10)$$

Оценку дисперсии эксперимента или дисперсии воспроизводимости $S_{\{y\}}^2$, характеризующей ошибку эксперимента, когда опыты повторялись в одной экспериментальной нулевой точке, определяли по уравнению [7]

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{S_E}{f_E} = \frac{\sum_1^{n_0} (y_{0i} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1},$$

где S_E – сумма квадратов отклонений в нулевой точке; f_E – число степеней свободы, $f_E = n_0 - 1 = 5$; y_{0i} – результат отдельного наблюдения в нулевой точке; \bar{y}_0 – результат опыта в нулевой точке (среднее арифметическое), $\bar{y}_0 = 1,13$ (см. табл. 2); n_0 – число наблюдений в нулевой точке, $n_0 = 6$.

Тогда имеем (см. табл. 2)

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{2 \cdot 9 + 2 \cdot 25 + 2 \cdot 16}{10^4 (6 - 1)} = 20 \cdot 10^{-4}.$$

Знание дисперсии $S_{\{y\}}^2$ даёт возможность оценить значимость коэффициентов уравнения (10) регрессии и упростить его путём отсеивания части факторов.

При планировании второго порядка значимость коэффициентов регрессии определяли из следующих соотношений [7]:

$$\Delta b_0 = \pm 2S_{\{b_0\}}, \quad S_{\{b_0\}}^2 = 0,1591 S_{\{y\}}^2;$$

$$\Delta b_i = \pm 2S_{\{b_i\}}, \quad S_{\{b_i\}}^2 = 0,0417 S_{\{y\}}^2;$$

$$\Delta b_{ii} = \pm 2S_{\{b_{ii}\}}, \quad S_{\{b_{ii}\}}^2 = 0,0341 S_{\{y\}}^2;$$

$$\Delta b_{ij} = \pm 2S_{\{b_{ij}\}}, \quad S_{\{b_{ij}\}}^2 = 0,0341 S_{\{y\}}^2.$$

В результате вычислений получим:

$$\Delta b_0 = \pm 3,6 \cdot 10^{-2}; \quad b_i = \pm 1,82 \cdot 10^{-2};$$

$$b_{ij} = \pm 2,24 \cdot 10^{-2}; \quad b_{ii} = \pm 1,65 \cdot 10^{-2}.$$

Сравнение абсолютных величин коэффициентов регрессии и соответствующих погрешностей в их оценке показывает, что с доверительной вероятностью $P_d = 0,95$ можно считать все парные коэффициенты и коэффициенты b_{33} и b_{55} незначимыми, т. к. они меньше по абсолютной величине соответствующих погрешностей.

Тогда уравнение регрессии (10) упрощается и имеет вид:

$$y = 1,13 + 0,156X_1 + 0,122X_2 + \\ + 0,23X_3 - 0,23X_4 + 0,2X_5 + \\ + 0,04X_1^2 + 0,364X_2^2 + 0,055X_4^2. \quad (11)$$

Гипотезу об адекватности (пригодности) модели (11) проверяли с помощью критерия Фишера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{\{\bar{y}\}}^2},$$

где $S_{ад}^2$ – остаточная дисперсия, или дисперсия адекватности; $S_{\{\bar{y}\}}^2$ – дисперсия воспроизводимости.

Если опыты дублировались только в нулевой точке, то для расчёта $S_{ад}^2$ использовалось следующее уравнение [7]:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_1^N (y_u - \hat{y}_u)^2 - \sum_1^{n_0} (y_{0i} - \bar{y}_0)^2}{N_0 - \lambda - (n_0 - 1)};$$

$$f_{ад} = N_0 - \lambda - (n_0 - 1),$$

где N_0 – общее число опытов, $N_0 = 32$; y_u – результаты отдельных опытов (см. табл. 2); \hat{y} – результаты расчётов по уравнению (11) (см. табл. 2); λ – число коэффициентов уравнения (11), $\lambda = 9$; $f_{ад}$ – число степеней свободы дисперсии адекватности, $f_{ад} = 18$.

Тогда в нашем случае имеем (см. табл. 2)

$$S_{ад}^2 = \frac{301 - 100}{10^4 (32 - 9 - 5)} = 11,17 \cdot 10^{-4}.$$

Расчётное значение критерия Фишера

$$F_{рас.} = \frac{20 \cdot 10^4}{10^4 \cdot 15,6} = 1,79.$$

Зная число степеней свободы для большей ($f_E = 5$) и меньшей ($f_{ад} = 18$) дисперсий, находим табличное значение критерия Фишера для доверительной вероятности 0,95: $F_{табл.} = 2,71$ [7].

Таким образом, учитывая, что $F_p = 1,79 < F_{табл.} = 2,71$, уравнение (11) можно считать адекватным с 95-процентной доверительной вероятностью.

Используя зависимость (9), получим формулы перехода от кодированных к именованным величинам:

$$X_1 = \frac{S - 0,5}{0,15}; \quad X_2 = \frac{t - 0,5}{0,15};$$

$$X_3 = V - 4; \quad X_4 = V_p \cdot 10^5 - 2,5 \cdot 10^5;$$

$$X_5 = N - 3.$$

Подставив в (11), получим

$$R_a = 1,78S^2 - 0,7S + 1,62t^2 - 0,81t + \\ + 0,23V + 0,06V_p^2 \cdot 10^{10} - 0,51V_p \cdot 10^5 + \\ + 0,2N + 0,46. \quad (12)$$

Дифференцируя это выражение по S , t и V_p , находим оптимальные значения подачи, глубины резания и скорости перемещения РК, при которых шероховатость поверхности минимальна:

$$S_{опт} = 0,21 \text{ мм/об}; \quad t_{опт} = 0,25 \text{ мм};$$

$$V_p^{опт} = 4,25 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}.$$

Как видим из зависимости (12), изменение шероховатости от скорости V_p перемещения РК и числа N её оборотов диаметрально противоположно. Это позволяет, используя зависимость (12), не изменяя производительности, спрогнозировать величину скорости V_p , обеспечивающую постоянную величину R_a шероховатости поверхности при каждом очередном обороте РК:

$$V_{pN} = 4,25 - \sqrt{\frac{18,1 + V_{p1}^2 \cdot 10^{10} -}{-8,5V_{p1} \cdot 10^5 - 3,3(N-1)}}, \quad (13)$$

где V_{pN} – скорость перемещения РК при N_i -м обороте РК; N_i – текущее количество проходов (оборотов РК); V_{p1} – скорость перемещения РК при первом обороте.

Максимальное количество оборотов РК при сохранении постоянной величины шероховатости поверхности ($R_a = \text{const}$) ограничено скоростью РК первого прохода. Исходя из (13), получим

$$N_{\max} \leq 6,42 + 0,3V_{p1}^2 \cdot 10^{10} - 2,55V_{p1} \cdot 10^5. \quad (14)$$

В табл. 3 представлены значения скоростей V_{pN} режущей кромки, при которых обеспечивается при последующих её оборотах величина шероховатости R_{aN} , равная величине шероховатости R_{a1} первого прохода (оборота). Чем меньше начальная скорость V_{p1} первого прохода, тем больше число N оборотов она может сделать при обеспечении постоянного качества поверхности.

Табл. 3. Значения скорости V_{pN} перемещения режущей кромки от числа N её оборотов при сохранении постоянной величины R_a шероховатости поверхности после первого оборота ($S = 0,5$ мм/об; $t = 0,5$ мм; $V = 4$ м/с)

Скорость перемещения режущей кромки	Число оборотов режущей кромки N					Шероховатость поверхности после первого оборота режущей кромки $R_{a,}$ мкм	Максимальное число оборотов режущей кромки N_{\max}
	1	2	3	4	5		
$\frac{V_{pN}}{10^5}$, м/с	0,5	0,97	1,52	2,22	3,37	1,42	5
	1,0	1,55	2,26	3,47	–	1,21	4
	1,5	2,2	3,29	–	–	1,04	3
	2,0	2,92	–	–	–	0,88	2
	2,5	–	–	–	–	0,76	1
	3,0	–	–	–	–	0,67	1
	4,0	–	–	–	–	0,58	1
	4,25	–	–	–	–	0,57	1
	4,5	–	–	–	–	0,58	1

Таким образом, на основании выполненных исследований для многопроходного реза установлено влияние параметров режима обработки на шероховатость обрабатываемой поверхности, получена регрессионная зависимость, позволившая определить их оптимальные значения. Результаты разработанной математической модели процесса формирования шероховатости поверхности позволили, используя противоположное изменение её величины от скорости перемещения режущей кромки и числа полных оборотов, предложить способ обработки, обеспечивающий постоянную величину шероховатости при обработке многопроходным резцом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шатуров, Г. Ф. Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей / Г. Ф. Шатуров, Ж. А. Мрочек. – Минск : Технопринт, 2001. – 460 с.
2. Подураев, В. Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В. Н. Подураев. – М. : Машиностроение, 1977. – 304 с.
3. Коновалов, Е. Г. Основы новых способов металлообработки / Е. Г. Коновалов. – Минск : Изд-во АН БССР, 1961. – 297 с.
4. Крагельский, И. В. Узлы трения машин : справочник / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
5. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – М. : Наука, 1976. – 608 с.

6. Дрозд, М. С. Инженерные расчёты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Метлин, Ю. И. Сидякин. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.

7. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента / В. Б. Тихомиров. – М. : Лёгкая индустрия, 1974. – 262 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 23.03.2010

D. G. Shaturov
Formation of shaft surfaces roughness
when turning with cup-tip tools with
micro-renewed cutting edge

The paper deals with the effects of machining parameters on the formation of roughness of shaft surfaces with the cutting edge being repeatedly micro-renewed. The paper also gives the analytical dependence, the regression equation for determining the degree of roughness and the method of keeping it constant for the multi-pass tool.