



**Ключевые слова:**  
токарная обработка материалов, режущий инструмент, шероховатость на рабочих поверхностях инструмента, математические зависимости, вибрации

**Keywords:**  
turning of materials, cutting tool, roughness on working surfaces of the tool, mathematical dependences, vibration

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ ИНСТРУМЕНТОМ С СМП

Станислав МИХАЙЛОВ, Николай КОВЕЛЕНОВ, Сергей БОЛОТСКИХ

Изложена методика расчета шероховатости поверхности деталей при несвободном резании инструментом с различной геометрией в плане.

The article describes the methods of calculating the surface roughness of parts in a non-free cutting by tool with a different in terms geometry.

На формирование неровностей при обработке резанием существенное влияние оказывают геометрия инструмента, вибрации режущего инструмента и заготовки, пластические и упругие деформации в зоне контакта обрабатываемого материала с инструментом, шероховатость на рабочих поверхностях инструмента, вырыв частиц обрабатываемого материала. Степень влияния каждого фактора в зависимости от условий обработки может меняться. Поэтому обеспечение требуемого качества поверхностного слоя осуществляется на основе математических зависимостей, связывающих технологические условия резания с составляющими шероховатости обработанной поверхности.

При обработке пластичных материалов максимальная высота неровностей обработанной поверхности определяется четырьмя составляющими (рис. 1):

$$Rz = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (1)$$

где  $h_1$  — геометрическая составляющая шероховатости;  $h_2$  — шероховатость, вызванная вибрациями;  $h_3$  — шероховатость, зависящая от пластической деформации в зоне контакта заготовки и инструмента;  $h_4$  — шероховатость режущей кромки инструмента.

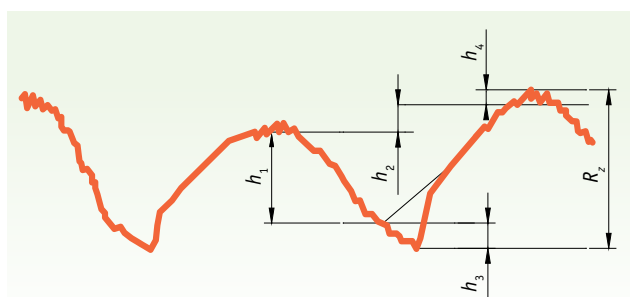


Рис. 1. Схема для расчета высоты профиля шероховатости поверхности при точении:  $h_1, h_2, h_3, h_4$  — составляющие шероховатости

Наибольшее влияние на формирование неровностей оказывает геометрия инструмента в плане. В процессе токарной обработки микронеровности образуются следы около вершины инструмента, имеющего определенную геометрическую форму. Для каждого сочетания условий резания требуется своя частная зависимость расчета геометрической высоты неровностей [1].

Для получения общей методики расчета шероховатости для различных геометрических параметров режущей пластины и условий обработки рассмотрим наиболее характерную схему несвободного резания [2] (рис. 2).

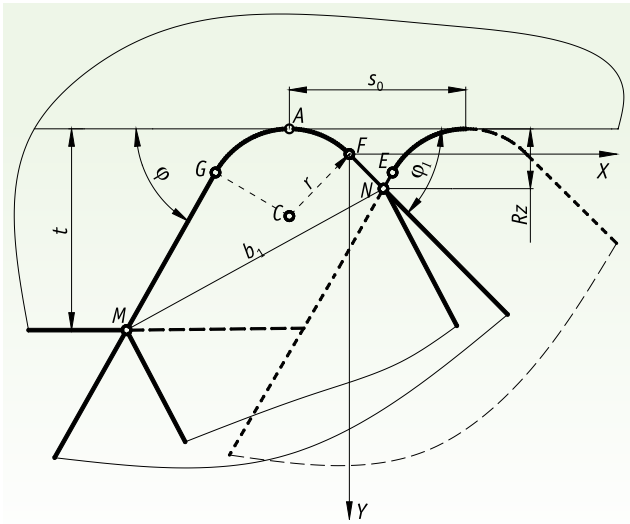


Рис. 2. Схема формирования неровностей при несвободном резании

Согласно схеме, координаты опорных точек реза и сечения срезаемого слоя определяются по формулам:

$$\begin{aligned} x_C &= -r \cdot \sin(\varphi_1); & x_G &= x_C - r \cdot \sin(\varphi); & x_A &= x_C; \\ y_C &= r \cdot \cos(\varphi_1); & y_G &= y_C - r \cdot \cos(\varphi); & y_A &= y_C - r; \end{aligned} \quad (2)$$

Из геометрического анализа графической модели сечения срезаемого слоя установлено, что координаты крайних точек активного участка режущей кромки  $M(x_M; y_M)$ ,  $N(x_N; y_N)$  зависят от размера  $(t - r + r \cdot \cos \varphi)$  и величины отрезков  $EN$  и  $FN$ , значения которых находятся по выражениям:

$$EN = \frac{s - r \left( \sin \varphi + \sin \varphi_1 + \frac{\cos \varphi_1 - \cos \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_1} \right)}{\sin \varphi / \operatorname{tg} \varphi_1 + \cos \varphi}; \quad (3)$$

при  $r \neq 0$ ,

$$FN = r \cdot \operatorname{ctg} \varphi_1 \cdot \left[ 1 + \frac{m - \sqrt{\operatorname{tg}^2 \varphi_1 \cdot (1 - m^2) + 1}}{(\operatorname{ctg}^2 \varphi_1 + 1) \cdot \sin \varphi_1} \right], \quad (4)$$

при  $r = 0$ ,

$$FN = \frac{s \cdot \sin \varphi}{\sin(\varphi + \varphi_1)}, \quad (5)$$

где  $m = s/r - \sin \varphi_1 - \operatorname{ctg} \varphi_1 \cdot \cos \varphi_1$ ;  $s$  – подача;  $r$  – радиус при вершине инструмента;  $j, j_1$  – главный и вспомогательный углы в плане.

Если снятие припуска осуществляется при условиях, когда  $EN \geq 0$ , то координаты точки  $N$  определяются по формулам:

$$\begin{aligned} x_N &= -r \cdot \sin \varphi_1 + s - r \cdot \sin \varphi - EN \cdot \cos \varphi; \\ y_N &= r \cdot \cos \varphi_1 + EN \cdot \sin \varphi - r \cdot \cos \varphi. \end{aligned} \quad (6) \quad (7)$$

Если  $EN < 0$ , то в зависимости от  $FN$  расчет ведется по формулам:

при  $FN \geq 0$ :

$$x_N = FN \cdot \cos \varphi_1; \quad y_N = FN \cdot \sin \varphi_1 \quad (8) \quad (9)$$

при  $FN < 0$ :

$$x_N = -r \cdot \sin \varphi_1 + \frac{s}{2}; \quad (10)$$

$$y_N = r \cdot \left( \cos \varphi_1 - \sin \left( \arccos \frac{s}{2 \cdot r} \right) \right). \quad (11)$$

Координаты точки  $M$  находятся из следующих условий:

если  $(t - r + r \cdot \cos \varphi) \geq 0$ , то

$$x_M = -r \cdot (\sin \varphi_1 + \sin \varphi) - \frac{t - r \cdot (1 - \cos \varphi)}{\operatorname{tg} \varphi}; \quad (12)$$

$$y_M = t - r \cdot (1 - \cos \varphi_1); \quad (13)$$

если  $(t - r + r \cdot \cos \varphi) < 0$ , то

$$x_M = -r \cdot \sin \varphi_1 - \sqrt{t \cdot (2 \cdot r - t)}; \quad (14)$$

$$y_M = t - r \cdot (1 - \cos \varphi_1). \quad (15)$$

где  $t$  – глубина резания.

По координатам опорных точек находим геометрическую составляющую шероховатости

$$h_1 = y_N - y_A. \quad (16)$$

Предложенная методика позволяет легко учесть наклон режущей пластины в державке, а также усложнение геометрии ее привершинной части.

Величина шероховатости  $h_2$ , обусловленная вибрациями режущего инструмента, определяется по формуле:

$$h_2 = \frac{c_y s^{y_{py}} v^{z_{py}} [HB_{\max}^n t^{x_{py}} - HB_{\min}^n (t - h_1)^{x_{py}}]}{J}, \quad (17)$$

где  $c_y, y_{py}, z_{py}, n, x_{py}$  – коэффициенты и показатели степени, зависящие от свойств обрабатываемого и инструментального материалов [3],  $h_1$  – исходная высота профиля шероховатости обрабатываемой поверхности;  $HB_{\max}, HB_{\min}$  – максимальная и минимальная твердость заготовки;  $J$  – жесткость технологической системы.

В результате уширения приконтактных слоев стружки и оттеснения гребешков шероховатости возможно некоторое увеличение образующихся в процессе резания микронеровностей на величину  $h_3$ , которая определяется по следующим зависимостям

$$\text{при } \varphi \geq \arcsin \frac{s}{2r} \text{ и } \varphi_1 \geq \arcsin \frac{s}{2r}, h_3 = \frac{b_0(2s + b_0)}{32r}, \quad (18)$$

$$\text{при } \varphi \geq \arcsin \frac{s}{2r} \text{ и } \varphi_1 < \arcsin \frac{s}{2r}, h_3 = \frac{b_o}{1 + \frac{2r}{\operatorname{tg} \varphi_1} + s}, \quad (19)$$

где  $b_o$  — величина пластического отгеснения,  $b_o = 0,5\rho(1 - \frac{\tau_p}{\sqrt{\tau_p^2 - \sigma_T^2}})$ ,  $\tau_p$  — прочность на сдвиг обрабатываемого материала,  $\sigma_T$  — предел текучести обрабатываемого материала,  $\rho$  — радиус округления режущей кромки.

Величина шероховатости вершины резца  $h_4$  зависит от способа заточки и изношенности пластины. Для неизношенного инструмента из мелкозернистых твердых сплавов принимается [4]:  $h_4 = 0,5$  мкм.

Подставив выражения (16–19) в уравнение (1), получим расчетную зависимость определения высоты неровностей обработанной поверхности  $Rz$  с учетом технологических условий обработки.

Другие параметры шероховатости могут быть выражены через значение  $Rz$  по формулам: среднеарифметическое отклонение профиля

$$Ra = 0,2Rz; \quad (20)$$

наибольшая высота профиля

$$R_{\max} = 6Ra; \quad (21)$$

радиусы кривизны вершин неровностей в продольном и поперечном направлениях (мкм)

$$r_{np} = \frac{40}{Rz^{0,488}}; \quad (22)$$

$$r_{non} = \frac{280}{Rz^{0,966}}; \quad (23)$$

средний шаг неровностей  $S_m$

$$\text{при } s \leq 2r \sin \varphi_1, S_m = 2\sqrt{Rz(2r - Rz)}; \quad (24)$$

$$\text{при } 2r \sin \varphi_1 < s \leq r \left[ \frac{1 - \cos(\varphi + \varphi_1)}{\sin \varphi_1} \right],$$

$$S_m = 2r \sin \left[ \varphi_1 - \operatorname{arctg} \frac{r - (1 - \cos \varphi_1) - 0,5Rz}{r \sin \varphi_1} \right] + Rz \cdot \operatorname{ctg} \varphi_1; \quad (25)$$

$$\text{при } s > r \left[ \frac{1 - \cos(\varphi + \varphi_1)}{\sin \varphi_1} \right], S_m = \frac{2r(1 - \cos \varphi_1)}{\sin \varphi_1} + 0,5Rz(\operatorname{ctg} \varphi + 3\operatorname{ctg} \varphi_1). \quad (26)$$

При анализе числовых значений составляющих  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  установлено, что наибольшее влияние на шероховатость оказывает  $h_1$ . При точении с оптимальной скоростью резания составляющими  $h_2$  и  $h_3$  можно пренебречь. В этом случае погрешность шероховатости не превышает 15%.

Экспериментальная апробация методики проведена с использованием сменных многогранных пластин производства компании ВИРИАЛ при оптимизации условий резания заготовок, изготовленных из различных сталей и сплавов. На основании полученных данных проведены испытания пластин в условиях производства НПО «Сатурн», которые подтвердили правильность полученных результатов. Выполнены исследования работоспособности пластин форм SNMG, CNMG, DNMG и VNMG при точении жаропрочного сплава ХН77ТЮР.

В настоящее время проводится апробация методики расчета параметров шероховатости на операции фрезерования.

## Вывод

Разработана общая методика расчета шероховатости поверхности при несвободном резании инструментом с различной геометрией в плане, позволяющая прогнозировать и подбирать оптимальные условия резания деталей на стадии проектирования технологического процесса и инструментального обеспечения токарной обработки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безъязычный В.Ф.* Метод подобия в технологии машиностроения. — М.: Машиностроение, 2012. 320 с.
2. *Михайлов С.В.* Методика расчета параметров сечения срезаемого слоя материала и направления схода стружки с инструмента / С.В. Михайлов, Д.С.Скворцов // Вестник КГТУ. — Кострома: КГТУ. 2004. № 9. С. 60–63.
3. *Безъязычный В.Ф.* Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей / В.Ф. Безъязычный, Т. Д. Кожина и др. — М.: МАИ, 1993. 84 с.
4. *Суслов А.Г.* Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. — М.: Машиностроение, 1987. 208 с.

**Станислав Васильевич МИХАЙЛОВ —**

доктор технических наук, профессор Костромского государственного технологического университета

**Николай Юрьевич КОВЕЛЕНОВ —**

кандидат технических наук, главный технолог ООО «Вириал»

**Сергей Викторович БОЛОТСКИХ —**

начальник бюро внедрения и технического сопровождения ООО «Вириал»