

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ РЕЗЦАМИ СО ВСТАВКАМИ ИЗ КОМПОЗИТОВ

© 2011 Е.А. Кудряшов<sup>1</sup>, Е.И. Яцун<sup>1</sup>, Е.В. Павлов<sup>1</sup>, А.И. Ремнев<sup>1</sup>, С.В. Швец<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет, г. Курск

<sup>2</sup> Сумской государственный университет, г. Сумы, Украина

Поступила в редакцию 27.09.2011

Рациональное применение дорогостоящих лезвийных режущих инструментов со вставками из синтетических сверхтвёрдых материалов – композитов – требует прогнозирования качества обработанной поверхности. Предложен алгоритм прогнозирования высоты остаточного гребешка в автоматизированном режиме. Получены математические зависимости для расчёта среднего арифметического отклонения профиля поверхности.

*Ключевые слова:* композит, параметр шероховатости, пластические деформации, алгоритм расчета

В отечественной и мировой промышленности растёт производство и применение лезвийных режущих инструментов из кубического нитрида бора – торговая марка – композит. Этот принципиально новый, как по технологии изготовления, так и по условиям эксплуатации инструментальный материал позволяет вести обработку со скоростями резания на порядок более высокими, чем твёрдые сплавы. Резцы, например, из композита 01 (эльбор-Р), предназначенные для непрерывной обработки закаленной стали твердостью 40-70 HRCs, чугунов твердостью 160-600 НВ, твёрдых сплавов марок ВК15, ВК20, ВК25, позволяют вести тонкую и чистовую обработку с глубиной резания 0,05-0,60 мм, подачами 0,05-0,6 мм и скоростями 60-600 м/мин. По данным ВНИИинструмента годовая потребность российского рынка в инструментах из композитов оценивается в 15-20 млн. долларов США,

однако в настоящее время отечественное производство и потребление не превышает 5% от указанной потребности. Одним из определяющих условий преодоления этого отставания является применение современного точного высокоскоростного оборудования.

При создании нового технологического процесса или при выборе формы и геометрических параметров режущего инструмента со вставками из композита возникает необходимость прогнозирования в автоматизированном режиме параметров шероховатости обработанной поверхности. Формализовать расчёт параметров шероховатости  $Rz$  и  $Ra$  возможно с учетом геометрических и кинематических факторов, приравнивая параметр  $Rz$  к теоретической высоте остаточного гребешка  $h_1$ . Величина  $h_1$  – ордината точки  $c$ , пересечения прямых (рис. 1), одна из которых – касательная к окружности радиуса  $r^1$  в точке  $a$ , а вторая – касательная к окружности радиуса  $r$  в точке  $b$ . Причем,  $r = r^1$  на смежных витках траектории с шагом, равным подаче  $S$ . Остаточный гребешок формируется главной режущей кромкой – часть дуги радиуса  $r$  и отрезок  $bc$ , а также вспомогательной режущей кромкой – часть дуги радиуса  $r^1$  и отрезок  $ac$ . Формулы (1), (2), (3) для расчета ординат точек  $c$  и  $f$ , предложенные в работе Суловым А.Г. [1], учитывают искажения высоты остаточного гребешка при наличии положительного переднего угла.

Ордината точки  $c$ :

$$y = S \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi^1 \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi^1 + \operatorname{tg} \varphi} + \frac{r}{\operatorname{tg} \varphi^1 + \operatorname{tg} \varphi} \left[ \operatorname{tg} \varphi^1 \left( 1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right) + \operatorname{tg} \varphi \left( 1 - \frac{1}{\cos \varphi^1} \right) \right] \quad (1)$$

Ордината точки  $f$ :

$$y_1 = r(1 - \cos \varphi) + S \cdot \sin \varphi \cos \varphi - \sin \varphi \sqrt{S \cdot \sin \varphi (2r - S \cdot \sin \varphi)} \quad (2)$$

*Кудряшов Евгений Алексеевич, доктор технических наук, профессор, первый проректор, проректор по учебной работе. E-mail: mtio@kurskstu.ru*

*Яцун Елена Ивановна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Машиностроительные технологии и оборудование». E-mail: mtio@kurskstu.ru*

*Павлов Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление качеством, метрология и сертификация». E-mail: evp.kstu@mail.ru*

*Ремнев Алексей Ильич, доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование». E-mail: alexeyremnev@mail.ru*

*Швец Станислав Владимирович кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: shvets46@yandex.ua*

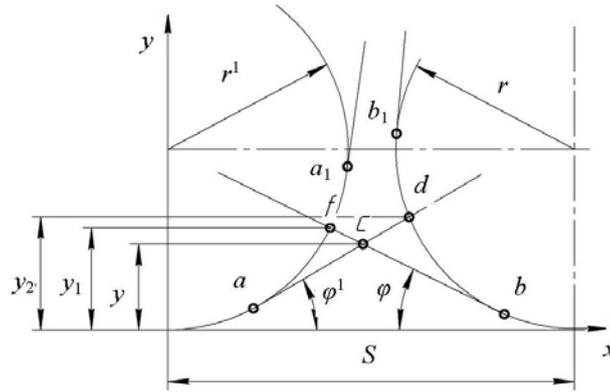


Рис. 1. Схема для расчета геометрической составляющей шероховатости поверхности

Высота остаточного гребешка  $h_1=y_1$ . В случае, когда точка  $b$  находится в положении  $b_1$ , остаточный гребешок ограничивается частью дуги радиуса  $r^1$ , отрезком  $ad$  и дугой радиуса  $r$  (при  $y_a < y$  и  $y_{b1} > y$ ). Высота  $h_1=y_2$  рассчитывается по формуле (2), но угол  $\varphi$  заменен на угол  $\varphi^1$

$$y_2 = r(1 - \cos \varphi^1) + S \sin \varphi^1 \cos \varphi^1 - \sin \varphi^1 \sqrt{S \sin \varphi^1 (2r - S \sin \varphi^1)} \quad (3)$$

Алгоритм расчёта  $Rz=h_1$  на ЭВМ представлен на рис. 2.

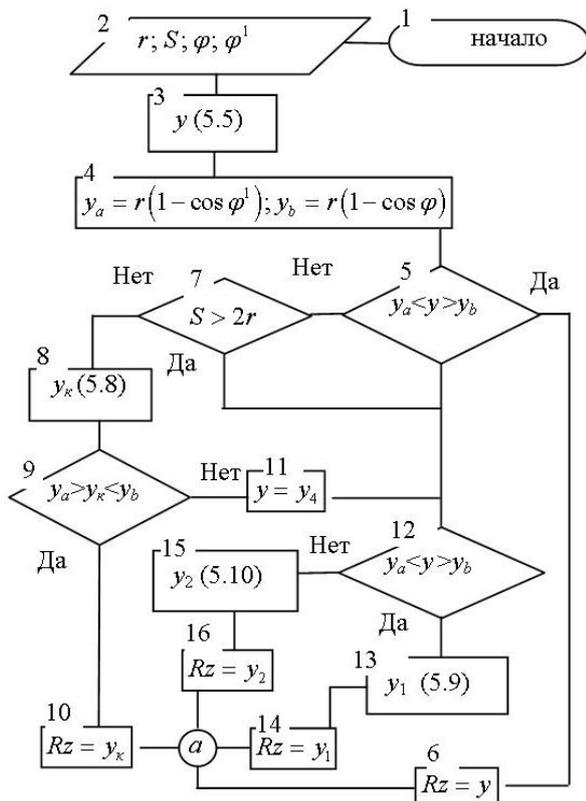


Рис. 2. Алгоритм расчета высоты остаточного гребешка или профиля

Геометрически шероховатость формируется при сочетании геометрии лезвия и подачи, однако это не окончательная форма микрорельефа, поскольку происходит искажение за счет пластических деформаций [2, 3]. Если ось  $x$  перенести на среднюю линию профиля поверхности, то среднее арифметическое отклонение профиля можно определить по формуле

$$Ra = \frac{1}{l} \left( \int_0^{x_a} |y(x)| dx + \int_{x_a}^{x_b} |y(x)| dx + \dots + \int_{x_n}^l |y(x)| dx \right),$$

где  $l$  – длина базовой линии;  $x_a, x_b, \dots, x_n$  – координаты, которые ограничивают функцию  $y(x)$  на оси  $x$ . Уравнение окружности радиуса  $r$  при таком перенесении оси  $x$  приобретет вид  $(y - r + \frac{Rz}{2})^2 + x^2 = r^2$ . Тогда  $y = r - \frac{Rz}{2} \pm \sqrt{r^2 - x^2}$ , а площадь под дугой, ограничивающей соответствующий участок шероховатости  $F_k = \int_{x_1}^{x_2} \left( r - \frac{Rz}{2} - \sqrt{r^2 - x^2} \right) dx$ . После преобразований:

$$F_k = \left( r - \frac{Rz}{2} \right) \Big|_{x_1}^{x_2} - \frac{r^2}{2} \arcsin \frac{x}{r} \Big|_{x_1}^{x_2} - \frac{x}{2} \sqrt{r^2 - x^2} \Big|_{x_1}^{x_2},$$

$$F_k = \left( r - \frac{Rz}{2} \right) (x_2 - x_1) - \frac{r^2}{2} \left( \arcsin \frac{x_2}{r} - \arcsin \frac{x_1}{r} \right) - \frac{x_2}{2} \sqrt{r^2 - x_2^2} + \frac{x_1}{2} \sqrt{r^2 - x_1^2} \quad (4)$$

Это выражение позволяет определить площади  $F_1, F_2, F_3$  (табл. 1), ограниченные дугой окружности радиуса  $r$ .

**Таблица 1.** Формирование среднего арифметического отклонения профиля

№	Схема отклонения профиля поверхности от средней линии	Условия создания слагаемых площади шероховатости
1		$y_a < Rz; y_b < Rz; y_a < Rz/2; y_b < Rz/2;$ $F = F_1 + F_7 + F_8 + F_9 + F_{10} + F_4$
2		$y_a < Rz; y_b < Rz; y_a > Rz/2; y_b > Rz/2;$ $F = F_2 + F_3 + F_{12} + F_{11} + F_6 + F_5$
3		$y_a > Rz; y_b > Rz;$ $F = F_2 + F_3 + F_6 + F_{11} + F_5$
4		$y_a > Rz; y_b < Rz; y_b < Rz/2;$ $F = F_2 + F_3 + F_9 + F_{10} + F_4$
5		$y_a > Rz; y_b < Rz; y_b > Rz/2;$ $F = F_2 + F_3 + F_{11} + F_6 + F_5$
6		$y_a < Rz; y_b > Rz; y_a < Rz/2;$ $F = F_1 + F_7 + F_8 + F_6 + F_5$
7		$y_a < Rz; y_b > Rz; y_a > Rz/2;$ $F = F_2 + F_3 + F_{12} + F_6 + F_5$

По этой же формуле можно найти и площади  $F_4, F_5, F_6$ , ограниченные дугой радиуса  $r^1$ , если вместо значений  $x_1$  и  $x_2$  подставлять координаты начала и конца дуги, уменьшенные на

величину  $S$ . Тогда площади  $F_9, F_{10}, F_{11}$ , которые ограничиваются вспомогательной режущей кромкой, определяются по формуле:

$$F_6 = \int_{x_1}^{x_2} \left( r \left( 1 - \frac{1}{\cos \varphi^1} \right) + x \operatorname{tg} \varphi^1 - \frac{Rz}{2} \right) dx$$

$$F_6 = \int_{x_1}^{x_2} \left( r \left( 1 - \frac{1}{\cos \varphi^1} \right) - \frac{Rz}{2} \right) (x_2 - x_1) + \frac{\operatorname{tg} \varphi^1}{2} (x_2^2 - x_1^2) \quad (5)$$

Площади  $F_7, F_8, F_{12}$ , ограниченные главной режущей кромкой, определяются по формуле:

$$F_z = \int_{x_1}^{x_2} \left( r \left( 1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right) - x \operatorname{tg} \varphi + S \operatorname{tg} \varphi - \frac{Rz}{2} \right) dx$$

$$F_z = \int_{x_1}^{x_2} \left( r \left( 1 - \frac{1}{\cos \varphi^1} \right) - \frac{Rz}{2} + S \operatorname{tg} \varphi \right) (x_2 - x_1) + \frac{\operatorname{tg} \varphi}{2} (x_2^2 - x_1^2)$$
(6)

Координаты начала и конца линий, которые ограничивают характерные участки площади на схеме для определения  $Ra$ , равняются

$$x_a = \frac{y_a - r \left( 1 - \frac{1}{\cos \varphi^1} \right)}{\operatorname{tg} \varphi^1}; \quad x_d = \frac{\frac{Rz}{2} - r \left( 1 - \frac{1}{\cos \varphi^1} \right)}{\operatorname{tg} \varphi^1}; \quad x_c = \frac{Rz - r \left( 1 - \frac{1}{\cos \varphi^1} \right)}{\operatorname{tg} \varphi^1};$$

$$x_e = \frac{-\frac{Rz}{2} - r \left( 1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right) + S \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi}; \quad x_b = \frac{-y_b + r \left( 1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right) + S \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi}; \quad x_f = \sqrt{r^2 - \left( \frac{Rz}{2} - r \right)^2};$$

$$x_g = S - \sqrt{r^2 - \left( \frac{Rz}{2} - r \right)^2}; \quad x_n = \sqrt{r^2 - (Rz - r)^2}$$

Определяем все слагаемые любой общей площади (см. табл. 1) в соответствии с одной из схем расчета  $Ra$  (рис. 3):

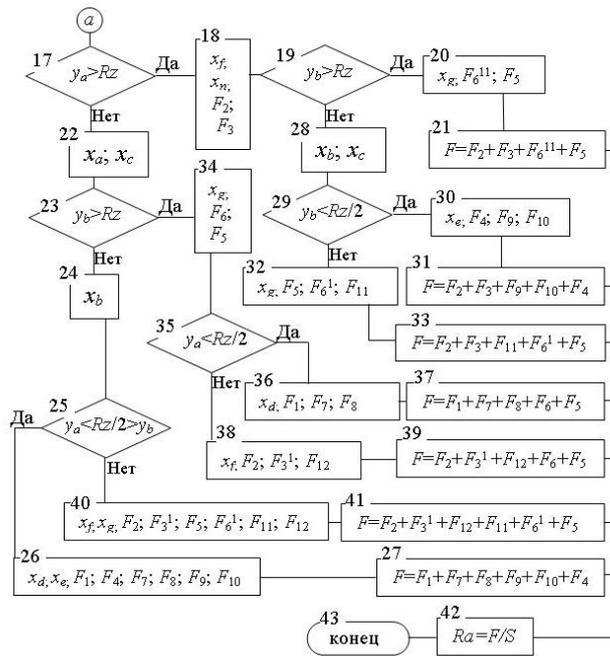
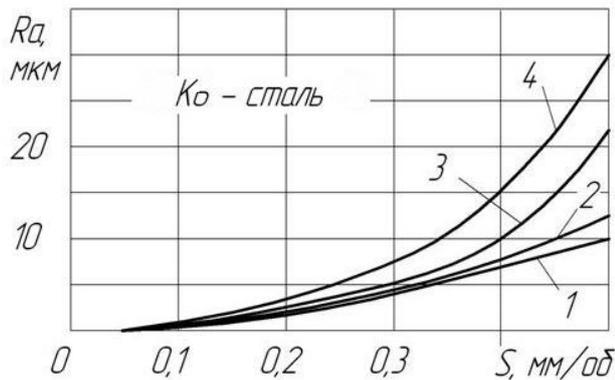


Рис. 3. Алгоритм расчета среднего арифметического отклонения профиля

Площадь  $F$  изменяется в пределах подачи  $S$  и периодически повторяется при любом значении  $l$ , поэтому для определения среднего арифметического отклонения профиля достаточно разделить  $F$  на  $S$ .

Геометрически шероховатость формируется при сочетании геометрии лезвия и подачи, однако это не окончательная форма микрорельефа, поскольку происходит искажение за счет пластических деформаций [4]. При больших скоростях резания на многоцелевом станке

VN4000, когда пластические деформации незначительны, расчетные значения параметра шероховатости  $Ra$  (рис. 4, кривая 1) практически совпадают с экспериментальными (рис. 4, кривая 2). Материал инструмента – композит Ко, обрабатываемый материал – сталь 30ХГСА. С увеличением пластической деформации в зоне резания (при понижении скорости резания) экспериментальные значения  $Ra$  отклоняются от расчетных (рис. 4, кривые 3, 4) [5, 6].



**Рис. 4.** Расчетные(1) и экспериментальные(2, 3, 4) зависимости параметра шероховатости от подачи при различных скоростях резания:  
 $D_{\text{зар}}=40$  мм;  $t=0,3$  мм; 1,2 –  $V=249$  м/мин; 3 –  $V=178$  м/мин; 4 –  $V=49$  м/мин

**Вывод:** предложенный алгоритм расчета геометрической составляющей высоты микронеровностей и среднего отклонения профиля поверхности полностью автоматизирует процесс и исключают предварительный анализ ограничивающих условий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. 208 с.
2. Швеи, С.В. Геометрическое формирование высоты остаточного гребешка при точении / С.В. Швеи, О.А. Розенберг // Вестник СемГУ. 2000. №15, С. 97-99.
3. Емельянов, С.Г. Расчет и моделирование геометрической составляющей параметров шероховатости поверхности при точении / С.Г. Емельянов, А.И. Ремнев, С.В. Швеи // Известия Курского государственного технического университета. 2008. № 3 (24). С. 84-89.
4. Кудряшов, Е.А. Обработка деталей инструментом из композитов в осложненных технологических условиях. – Чита, Изд-во Читинского государственного технического университета, 2002. Т. 1. 256 с.
5. Кудряшов, Е.А. Повышение эффективности работы инструментов из сверхтвердых материалов в сложных технологических условиях / Е.А. Кудряшов, Е.И. Яцун, Е.В. Павлов и др. // Сб. трудов XVII межд. научно-технич. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века», Донецк, 2010. Т. 2. С. 51-55.
6. Кудряшов, Е.А. Технология восстановления работоспособности деталей повышенной конструктивной сложности инструментом из композита / Е.А. Кудряшов, Е.И. Яцун, Е.В. Павлов и др. // Новые материалы и технологии в машиностроении. Сб. научных трудов Брянской государственной инженерно-технологической академии. 2010. Вып. 12. С. 69-71.

## MODELING AND CALCULATION OF THE SURFACE ROUGHNESS IN TURNING CUTTERS WITH INLAYS OF COMPOSITES

© 2011 Е.А. Kudryashov<sup>1</sup>, Е.І. Yatsun<sup>1</sup>, Е. V. Pavlov<sup>1</sup>, А.І. Remnev<sup>1</sup>, S. V. Shvets<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University, Kursk

<sup>2</sup> Sumy State University, Sumy, Ukraine

Efficient use of costly blade cutting tools with inserts of synthetic superhard materials (CTM) – composites requires predicting the quality of the machined surface. An algorithm for predicting the height of the residual scallop in automated mode is offered. The mathematical relations for calculating the average arithmetical aberration of surface profile are received.

*Key words:* composite, roughness parameter, plastic deformations, algorithm of calculation

Evgeniy Kudryashov, Doctor of Technical Sciences, Professor, First Prorector on Education Work. E-mail: mtio@kurskstu.ru

Elena Yatsun, Candidate of Technical Sciences, Head of the “Machine Building Technologies and Equipment” Department. E-mail: mtio@kurskstu.ru

Evgeniy Pavlov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the “Quality Management, Metrology and Certification” Department. E-mail: evp.kstu@mail.ru

Aleksey Remnev, Doctor of Technical Sciences, Professor at the “Machine Building Technologies and Equipment” Department. E-mail: alexeyremnev@mail.ru

Stanislav Shvets, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the “Machine Building Technology, Machine Tools and Instruments” Department. E-mail: shvets46@yandex.ua