

УДК 621.923

Матюха П.Г., Габитов В.В.
ДонНТУ, г. Донецьк, Україна

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОТЫ НЕРОВНОСТЕЙ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ РЕЗАНИЯ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ

Введение

Производительность и качество обработки при шлифовании по упругой схеме зависит от усилия поджима обрабатываемого образца к рабочей поверхности круга (РПК) и от условий контактирования зерен с обрабатываемым материалом [1]. Условия контактирования режущих зерен влияют на параметры единичных срезов, которые, в свою очередь, определяют формирование неровностей на поверхности резания. От высоты неровностей на поверхности резания зависит зазор между связкой круга и обрабатываемым материалом. Поэтому шероховатость на поверхности резания необходимо учитывать при назначении режимов шлифования с введением технологического тока в зону резания [2]. Она также определяет максимальную толщину запытообразных срезов, по значению которой можно судить о силах резания, объеме единичного среза, а следовательно, и о производительности процесса обработки [3].

В настоящее время известна методика определения шероховатости на поверхности резания при плоском врезном шлифовании, которая учитывает разновысотное расположения зерен на РПК и образуемых ими царапин разной глубины в зависимости от положения исследуемого сечения относительно вертикальной оси круга [4]. Данные о расчете высоты неровностей на поверхности резания при внутреннем шлифовании в литературе отсутствуют.

Целью данной работы является разработка методики определения шероховатости на поверхности резания при внутреннем врезном шлифовании.

Основная часть

Рассмотрим последовательность расчета высоты неровностей на поверхности резания при внутреннем врезном шлифовании основываясь на следующих допущениях:

- расчет выполняется при обработке шлифовальным кругом отверстия детали в момент после его врезания в материал заготовки на глубину t_{ϕ} ;
- обрабатываемая поверхность в начальный период обработки представляет собой идеальную цилиндрическую поверхность, шероховатость на которой отсутствует;
- форма царапины в обрабатываемом материале соответствует форме модели режущей части зерна;
- в пределах рассматриваемого интервала расчета режущие зерна РПК считаются равновысокими, т.е. расположены на одной линии в сечении обрабатываемой поверхности вдоль образующей круга;
- упругие деформации системы СПИД и пластические искажения поперечного профиля срезов не учитываются.

При внутреннем врезном шлифовании (рис. 1) круг радиусом R_k вращается со скоростью V_k , а деталь вращается в противоположном направлении со скоростью V_o . Глубина резания t_{ϕ} превышает наибольшую высоту неровностей обработанной поверхности. Формирование шероховатости на поверхности резания осуществляется перекрывающимися в поперечном направлении запытообразными срезами [5]. В связи с этим условием, критерием полной обработки поперечного сечения поверхности резания будет условие, согласно которому вероятность появления единичного среза будет меньше 0,1:

$$B \cdot 10^3 > \sum_{i=1}^{z_p} b_i \geq 0,9B \cdot 10^3, \quad (1)$$

где z_p – количество зерен, участвующих в формировании неровностей в поперечном сечении поверхности резания;

B – ширина шлифования, мм.

Учитывая, что глубина единичного среза в исследуемом сечении на поверхности резания определяется разновысотностью зерен на РПК, а также расстоянием между этим сечением в момент контакта с зерном и плоскостью, проведенной горизонтально через центр шлифовального круга, глубину резания t_ϕ разобьем на ряд малых интервалов ΔR . Значение интервала выбирается исходя из условия, что в нем оставит след не менее одного зерна.

Рабочую поверхность круга также разобьем на ряд слоев толщиной ΔR и определим участки слоев поверхности круга, которые оставят следы в соответствующих интервалах сечения детали.

Образование срезов на профиле AD (см. рис. 1) высотой t_ϕ и суммарной шириной B начинается с его расположения в точке 0. При перемещении сечения из точки 0 в точку 1 в работу вступают наиболее выступающие вершины зерен, расположенные на участке ab слоя 1" шлифовального круга. Потому как в пределах слоя ΔR зерна считаются равновысокими, то зерна, расположенные в объеме РПК $ab \times B \times \Delta R$, оставят следы в интервале 1' сечения AD глубиной ΔR и шириной $b_i(\Delta R)$. В связи с тем, что согласно принятым допущениям обрабатываемая поверхность не имеет исходной шероховатости, то вероятность появления срезов в сечении AD при его нахождении в т. 1 равна единице.

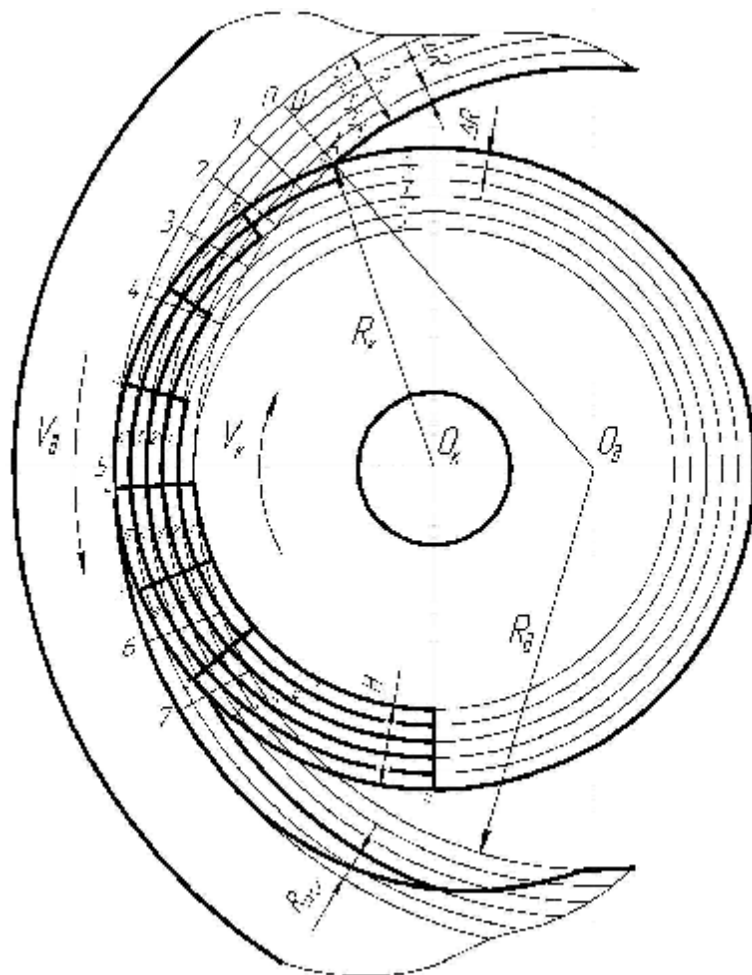


Рис. 1 - Схема внутреннего врезного шлифования

При дальнейшем перемещении сечения AD в т. 2 в работу вступят зерна, расположенные в слое 1" объемом $bc \times B \times \Delta R$, которые оставят следы в интервале 2' сечения

AD глубиной $2\Delta R$ и шириной $b_i(2\Delta R)$. Кроме того, в работу вступят зерна, расположенные в более глубоком слое 2" круга объемом $bc \times B \times \Delta R$. Они оставят следы в интервале 1' глубиной ΔR и шириной $b_i(\Delta R)$. При этом вероятность появления срезов E определится, как отношение

общей ширины необработанного сечения $(B - \sum_{i=1}^{z_h} b_i)$ к ширине обработки B :

$$E = \frac{1 - \sum_{i=1}^{z_p} b_i}{B}, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^{z_p} b_i$ – суммарная ширина единичных срезов, образованных в сечении AD при

его нахождении в предыдущей точке 1.

При перемещении сечения AD в точку 3 в работу вступают зерна, расположенные в слое $cd \times B \times \Delta R$. Они оставят следы в интервале 3' глубиной $3\Delta R$ и шириной $b_i(3\Delta R)$. Зерна слоя 2" объемом $cd \times B \times \Delta R$ оставят следы в интервале 2' шириной $b_i(2\Delta R)$ и глубиной $2\Delta R$. В работу также вступят зерна, расположенные в слое 3" объемом $cd \times B \times \Delta R$. Они оставят следы в интервале 1' шириной $b_i(\Delta R)$. Вероятность появления срезов при этом рассчитывается по

формуле (2) с учетом того, что $\sum_{i=1}^{z_p} b_i$ – суммарная ширина срезов сечения AD при его

положении в точке 2.

Далее аналогично определяется высота неровностей на поверхности резания в сечении AD при его прохождении по всей дуге контакта круга с заготовкой.

Последовательно перемещая исследуемое сечение по всей дуге контакта круга с заготовкой, определяют суммарную ширину срезов в точках на дуге контакта, до тех пор, пока не выполнится неравенство (1). В этом случае значение максимальной высоты неровностей на поверхности резания R_{max} составит:

$$R_{max} = N' \cdot \Delta R, \quad (3)$$

где N' – номер интервала, на котором выполнено неравенство (1).

После выполнения неравенства (1) слой заготовки 1' в сечении AD считается полностью удаленным, поэтому фактическую глубину шлифования t_ϕ следует уменьшить на величину ΔR и выполнить перенумерацию исследуемых интервалов.

Расчет по описанной методике заканчивается, если сечение AD находится в одной горизонтальной плоскости с осью вращения круга (точка 5 на рис. 1).

Рассмотрим методику определения суммарной ширины срезов при прохождении сечением AD точек 1, 2, ..., N при ширине обработки $B = 1$ мм.

Точка 1. Путь, пройденный сечением AD из точки 0 в точку 1:

$$L_{01} = \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_d \cdot t_\phi}{R_d - R_k}} - \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_d \cdot (t_\phi - \Delta R)}{R_d - R_k}}.$$

Выразим глубину резания t_ϕ через общее количество интервалов сечения детали:

$$K_d = \frac{t_\phi \cdot 10^3}{\Delta R}.$$

Тогда:

$$L_{01} = \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_d \cdot K_d \cdot \Delta R \cdot 10^3}{R_d - R_k}} - \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_d \cdot \Delta R \cdot 10^3 \cdot (K_d - 1)}{R_d - R_k}}.$$

После преобразований получим:

$$L_{01} = \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_d \cdot \Delta R \cdot 10^3}{R_d - R_k}} \cdot (\sqrt{K_d} - \sqrt{K_d - 1}).$$

Определим количество режущих зерен, находящихся в объеме РПК $ab \times 1 \times \Delta R$, которые оставят следы в интервале 1', через функцию распределения разновысотности и с учетом того, что:

$$ab = \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \cdot L_{01}.$$

Тогда:

$$Z_{ab} = \frac{60 \cdot V_k}{V_d \cdot S_{зп}^2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_d \cdot \Delta R \cdot 10^3}{R_d - R_k}} \cdot (\sqrt{K_d} - \sqrt{K_d - 1}) \cdot F(\Delta R).$$

Для упрощения выражения введем обозначение:

$$A = \frac{60 \cdot V_k}{V_d \cdot S_{зп}^2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_d \cdot \Delta R \cdot 10^3}{R_d - R_k}}.$$

При известной ширине единичного среза $b(\Delta R)$ и вероятности появления единичной риски $E_1 = 1$ суммарная ширина срезов будет равна:

$$b_1 = A \cdot (\sqrt{K_d} - \sqrt{K_d - 1}) \cdot F(\Delta R) \cdot b(\Delta R). \quad (4)$$

Результат расчета выражения (4) проверяется на выполнение неравенства (1). Если неравенство (1) не выполняется, то выполняют расчет для точки 2.

Точка 2. Ширина срезов от зерен слоя 1'' объемом $bc \times 1 \times \Delta R$, которые оставят следы в интервале 2' глубиной $2\Delta R$, и от зерен слоя 2'' объемом $bc \times 1 \times \Delta R$, оставивших следы в интервале 1' глубиной ΔR , при перемещении сечения из точки 1 в точку 2:

$$b'_2 = A \cdot E_2 \cdot \left[F(\Delta R) \cdot (\sqrt{K_d - 1} - \sqrt{K_d - 2}) \cdot b(2\Delta R) + F(2\Delta R) \cdot (\sqrt{K_d - 1} - \sqrt{K_d - 2}) \cdot b(2\Delta R) \right]$$

Вероятность появления срезов:

$$E_2 = 1 - \frac{b_1}{10^3}.$$

С учетом срезов, оставленных участком поверхности ab при прохождении сечением AD точки 1:

$$b_2 = b_1 + b'_2. \quad (5)$$

Результаты расчета по формуле (5) проверяются на выполнения неравенства (1). В случае невыполнения переходят к расчету в следующей точке по аналогичному принципу.

Точка N. В общем случае ширина срезов от режущих зерен, вступивших в работу при перемещении сечения AD из точки $N-1$ в N :

$$b'_N = A \cdot E_N \sum_{i=1}^{N'} F(i\Delta R) \cdot (\sqrt{K_d - N' + 1} - \sqrt{K_d - N'}) \cdot b[(N' - i + 1)\Delta R], \quad (6)$$

где N' – номер исследуемого интервала, $N' = 1, 2, 3, \dots, K_d$;

i – номера интервалов, входящих в N' , $i = 1, 2, 3, \dots, N'$.

Вероятность появления единичных срезов:

$$E_N = 1 - \frac{b_{N-1}}{10^3}.$$

Суммарная ширина срезов в точке N с учетом обработки в предыдущих точках:

$$b_N = b_{N-1} + b'_N. \quad (7)$$

Величини, входящие в формулу (6), рассчитываются по следующим зависимостям:

$$F(i\Delta R) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{\Delta R^m}{X_0}\right), & \text{при } i = 1; \\ \exp\left(-\frac{(i-1) \cdot \Delta R^m}{X_0}\right) - \exp\left(-\frac{i \cdot \Delta R^m}{X_0}\right), & \text{при } i \geq 1; \end{cases} \quad (8)$$

где m и X_0 – параметры распределения Вейбулла, описывающего распределение вершин зерен на РПК по высоте.

Ширина единичного среза определяется по зависимостям:

$$b'[(N-i+1)\Delta R] = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho [(N'-i+1) \cdot \Delta R] - [(N'-i+1)\Delta R]^2}, & \\ \text{при } (N-i+1)\Delta R < \rho \cdot (1 - \sin \frac{\varepsilon}{2}); & \\ 2 \cdot \left\{ \sqrt{2 \cdot \rho \cdot a_z - a_z^2} + [(N-i+1) \cdot \Delta R - a_z] \cdot \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} \right\}, & \\ \text{при } (N-i+1)\Delta R \geq \rho \cdot (1 - \sin \frac{\varepsilon}{2}); & \end{cases} \quad (9)$$

$$a_z - \text{толщина единичного среза, } a_z = \rho \cdot \left(1 - \sin \frac{\varepsilon}{2}\right);$$

ε, ρ – угол заострения и радиус округления вершины конической модели зерна соответственно.

Как отмечалось ранее, минимально допустимое значение величины интервала расчета ΔR определяется, исходя из условия вероятного попадания в него минимум одного зерна. Тогда формула для расчета минимальной величины ΔR при внутреннем шлифовании будет иметь вид:

$$\frac{B \cdot 60 \cdot V_k}{V_d \cdot S_{zn}^2} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_d \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}}{R_d - R_k}} \cdot F(\Delta R) \geq 1, \quad (10)$$

где B – ширина шлифовального круга, мм.

Неравенство (10) рассчитывается последовательным увеличением интервала ΔR с принятым шагом до выполнения условия.

Для анализа высоты неровностей профиля R_{max} на поверхности резания с использованием предложенной методики была разработана программа для ПЭВМ в среде Mathcad.

Расчеты были выполнены для условий внутреннего шлифования кругом 1A1 40×16×10×5 AC6 100/80 4 M2-01 при следующих режимах: $V_k = 25$ м/с, $V_d = 3, 6, 9$ м/мин, диаметр внутреннего шлифуемого отверстия $D_d = 50$ мм.

Параметры рельефа рабочей поверхности круга: модель зерен – конус с округленной вершиной радиусом $\rho = 6,69$ мкм и углом заострения $\varepsilon = 91^\circ$, расстояние между рабочими зёрнами на РПК $S_{zp} = 0,32$ мм, распределение разновысотности зерен описывается законом Вейбулла с параметрами $X_0 = 81,2$ и $m = 1,45$. Величина интервала расчета принята $\Delta R = 0,12$ мкм и удовлетворяет условию неравенства (10).

Результаты расчета для фактической глубины шлифования $t_\phi = 0,01$ мм представлены на рис. 2 и показывают, что существует точка на дуге контакта круга с заготовкой, в которой высота неровностей R_{max} приобретает максимальное значение и снижается при дальнейшем

перемещении рассматриваемого сечения до точки врезания круга в заготовку. С увеличением скорости детали V_d высота неровностей R_{max} увеличивается и точка максимума достигается при больших значениях длины дуги контакта круга с заготовкой.

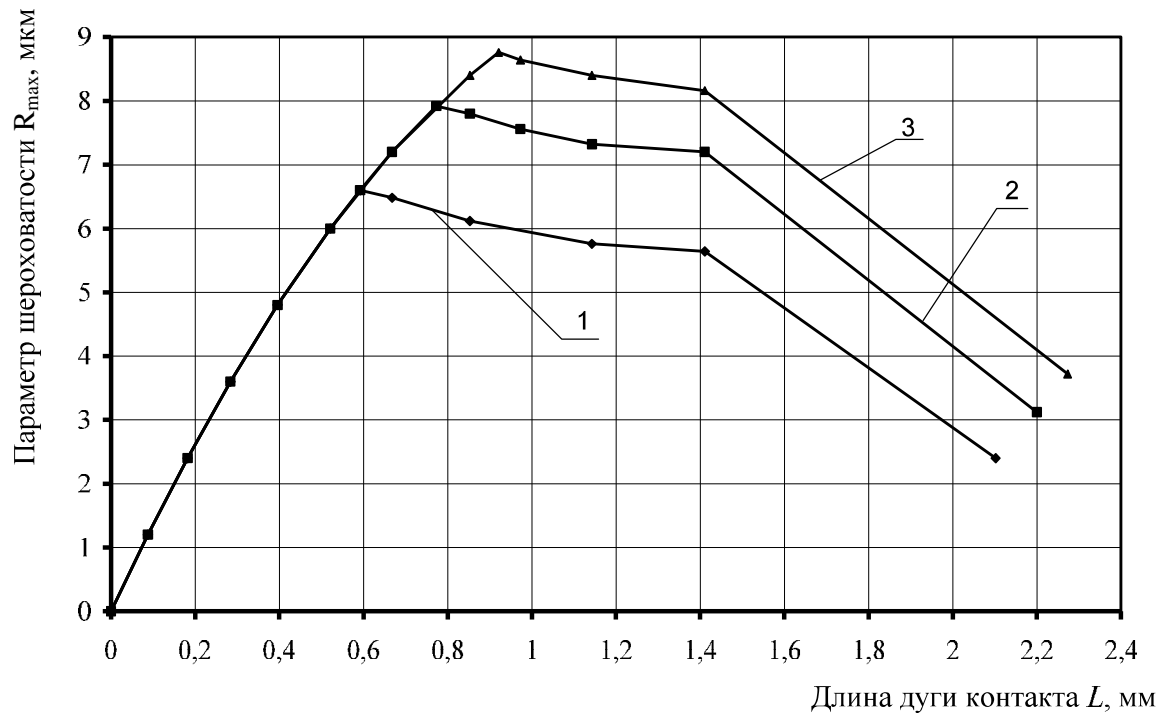


Рис. 2 - Влияние скорости детали на наибольшую высоту неровностей поверхности резания:
 $V_d = 3$ (1), 6 (2), 9 (3) м/мин

Таблица. 1

Влияние глубины шлифования на наибольшую высоту неровностей поверхности резания

Скорость детали V_d , м/мин	Глубина шлифования t_{ϕ} , мм	Наибольшая высота неровностей R_{max} , мкм
3	0,05	4,8
	0,01	6,6
	0,015	7,4
6	0,05	5,0
	0,01	7,9
	0,015	9,1
9	0,05	5,0
	0,01	8,8
	0,015	10,3

С увеличением глубины шлифования t_{ϕ} наибольшая высота неровностей на поверхности резания также увеличивается. Значения параметра шероховатости R_{max} в точках максимума для различных глубин шлифования приведены в таблице.

Наибольшая высота неровностей поверхности резания R_{max} определяет глубину внедрения РПК в обрабатываемый материал. Поэтому, чтобы исключить контактирование

материала заготовки со связкой шлифовального круга, необходимо чтобы наибольшая высота неровностей, формирующихся на поверхности резания в процессе шлифования была меньше величины выступания зерен из связки круга H , т.е. $R_{max} < H$.

Выводы

1. Увеличение скорости детали V_d и фактической глубины t_f при внутреннем шлифовании приводит к росту наибольшей высоты неровностей R_{max} на поверхности резания.

2. Наибольшая высота неровностей R_{max} на поверхности резания определяет зазор между связкой круга и обрабатываемой поверхностью. Во избежание контакта связки круга с обрабатываемым материалом необходимо, чтобы величина выступания зерен из связки H была больше высоты неровностей на поверхности резания R_{max} .

Литература: 1. Работоспособность алмазных кругов/ М.Ф. Семко, М.Д. Узунян, Ю.А. Сизый, М.С. Пивоваров. – К.: Техніка, 1983. – 95 с. 2. Матюха П.Г. Високопродуктивне шліфування ванадієвих штампових та інструментальних сталей. – Донецьк: ДВНЗ „ДонНТУ”, 2008. – 222 с. 3. Матюха П.Г., Полтавець В.В. Алмазне шліфування з електроерозійними керуючими діями на робочу поверхню круга. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – 164 с. 4. Матюха П.Г., Терехова Л.К. Исследование высоты неровностей профиля поверхности резания при шлифовании // Резание и инструмент. 1990. Вып. 44. С. 114-121. 5. Матюха П.Г. Исследование форм среза при врезном алмазно-искровом шлифовании // Синтетические алмазы. 1979 г. Вып. 1. С. 39-42.

Рецензент: **Гузенко В.С.**, к.т.н., проф. ДГМА

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОТЫ НЕРОВНОСТЕЙ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ РЕЗАНИЯ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ

Матюха П.Г., Габитов В.В.

В статье был проведен анализ изменения параметров шероховатости поверхности резания при внутреннем шлифовании. Определено, что увеличение скорости резания материала и глубины шлифования приводит к увеличению максимальной высоты неровности поверхности резания.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОТИ НЕРІВНОСТЕЙ ПРОФІЛЮ ПОВЕРХНІ РІЗАННЯ ПРИ ВНУТРІШНЬОМУ ШЛІФУВАННІ

Матюха П.Г., Габітов В.В.

У статті був проведений аналіз зміни параметрів шорсткості поверхні різання при внутрішньому шліфуванні. Визначено, що збільшення швидкості різання матеріалу і глибини шліфування призводить до збільшення максимальної висоти нерівності поверхні різання.

INVESTIGATION OF THE HEIGHT OF ROUGHNESS PROFILE OF THE CUT SURFACE WITH INTERNAL GRINDING

Matyukha P.G., Gabitov V.V.

In this article was analyze change parameters of roughness cutting surface with inside cut-in grinding. Find, that extension of work-material rate and depth of grinding result in extension maximum height of surface imperfections cutting surface.

Ключевые слова: высота неровностей профиля, поверхность резания, внутреннее шлифование.

Ключеві слова: висота нерівностей профілю, поверхня різання, внутрішнє шліфування.

Key words: the height of roughness profile, the cut surface, internal grinding.