

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕОРИЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВЯЗКАХ

Новиков Ф.В. докт. техн. наук, Дитиненко С.А.
(г. Харьков, Украина)

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований шероховатости обработки при шлифовании алмазным кругом на металлической связке с условным одновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки.

Создание и применение алмазных кругов на металлических связках и способов их электроэрозионной правки открыло широкие перспективы эффективной обработки изделий из твердых сплавов и других материалов. На ряде операций предварительного и окончательного шлифования твердосплавных инструментов полностью исключена обработка обычными абразивными кругами, что позволило повысить производительность и качество обработки. Вместе с тем, в большинстве случаев применение алмазных кругов на металлических связках сдерживается по причине низкой чистоты обработки. Так, установлено, что после электроэрозионной правки алмазного круга 1А1 300x20x5 АС6 100/80 М1-01 4 на операции круглого наружного шлифования твердосплавных инструментов параметр шероховатости R_a достигает значения 3,0 мкм, тогда как, согласно технологическому процессу обработки ряда твердосплавных инструментов (используемых в авиационном производстве), требуется обеспечить шероховатость обработки на уровне $R_a = 0,1 \dots 0,2$ мкм. Такое большое значение $R_a = 3,0$ мкм обусловлено высокой прочностью удержания алмазных зерен в металлической связке, невозможностью зерен “утопать” в связку круга в процессе шлифования и соответственно небольшим числом режущих зерен.

При использовании более “мягких” связок зерна могут “утопать” в связку, что увеличивает количество одновременно работающих зерен и уменьшает параметр шероховатости R_a .

Каким же путем можно увеличить количество одновременно работающих зерен алмазного круга на металлической связке? Для этого обратимся к аналитической зависимости для расчета поверхностной концентрации алмазного круга [1]:

$$k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}, \quad (1)$$

где m - объемная концентрация зерен круга (например, 50; 100; 150); \bar{X} - зернистость круга, м; $(1 - \varepsilon)$ - безразмерный коэффициент, учитывающий степень выступающих зерен над уровнем связки круга, изменяется в пределах 0...1.

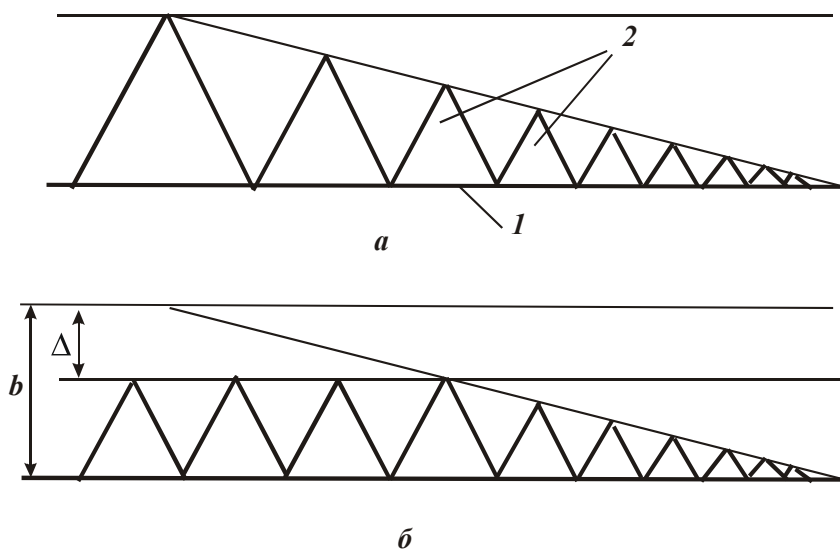


Рис. 1. Схемы разновысотного (а) и одновысотного (б) выступания над уровнем связки круга режущих зерен: 1- уровень связки круга, 2 – зерна.

Наибольшее влияние на параметр k оказывает зернистость круга \bar{X} , которая входит в зависимость (1) во второй степени. Уменьшение величины $\bar{X} \rightarrow 0$ - основной путь увеличения поверхностной концентрации зерен k и уменьшения R_a , что хорошо согласуется с практикой шлифования и доводки материала.

Вторым по степени важности условием увеличения k является увеличение коэффициента $(1 - \varepsilon)$, то есть обеспечение увеличенного выступания вершин

Рис. 1. Схемы разновысотного (а) и одновысотного (б) выступания над уровнем связки круга режущих зерен: 1- уровень связки круга, 2 – зерна.

зерен над уровнем связки круга. Однако, как известно, вследствие разновысотного выступания зерен, в резании будут участвовать не все зерна, расположенные на рабочей поверхности круга, а лишь наиболее выступающие. Число таких зерен небольшое, чем собственно и объясняются увеличенные значения R_a при шлифовании алмазными кругами на металлических связках.

Для того чтобы увеличить число режущих зерен, необходимо перейти от их разновысотного выступания к одновысотному (условно), как это показано на рис. 1. Очевидно, чем больше величина Δ , тем будет больше режущих зерен и меньше параметр R_a . Увеличение величины Δ предполагает увеличение максимальной высоты выступания зерен $b = \bar{X} \cdot (1 - \varepsilon)$. Перейти от разновысотного к условно одновысотному выступанию режущих зерен над уровнем связки можно притуплением режущих зерен, например, с помощью алмазного карандаша. При взаимодействии алмазных зерен круга и карандаша при шлифовании происходит их хрупкое разрушение, что практически приводит к одновысотному выступанию вершин режущих зерен над уровнем связки.

С целью проверки эффективности данного технологического приема были проведены экспериментальные исследования круглого наружного продольного шлифования алмазным кругом на металлической связке 1А1 300x20x5 АС6 100/80 М1-01 4. В качестве обрабатываемой детали использовался инструмент (рейбер) из твердого сплава ВК8.

После установки алмазного круга на круглошлифовальный станок производилось вскрытие алмазного слоя круга и устранение биения с использованием электроэрозионной правки. Был применен источник постоянного тока (напряжение - $U = 36$ В, сила тока - $I = 0 \dots 100$ А), электродом служила стальная цилиндрическая заготовка, которая крепилась в центрах круглошлифовального станка и совершала вращательное и продольное движения.

Электроэрозионная правка производилась силой тока до 100А. Регулирование силы тока осуществлялось за счет поперечной подачи электрода. Время начального вскрытия алмазного слоя круга и устранения биения до уровня 0,01 мм составило приблизительно 20 минут.

Шлифование твердосплавного рейбера производилось без применения электроэрозионной правки (то есть при отключенном источнике технологического тока).

Опытами установлено, что шероховатость обработки при шлифовании вновь заправленным алмазным кругом составляет $R_a = 3,0$ мкм ($V_{кр} = 30$ м/с; $V_{дет} = 15$ м/мин; $S_{np} = 5$ мм/об; $t = 0,05$ мм). Такое большое значение параметра R_a обусловлено тем, что шлифование производится алмазным кругом с “острым” режущим рельефом, сформированным в процессе электроэрозионной правки и характеризующем значительной высотой выступания зерен над уровнем связки круга. Шлифование таким кругом обеспечивает высокопроизводительный съём обрабатываемого материала.

Необходимо отметить, что изменение параметров режима шлифования: $V_{дет}$, S_{np} , t не привело к заметному изменению параметра R_a .

Были проведены опыты по оценке влияния величины Δ на шероховатость обработки. С этой целью с помощью алмазного карандаша произведено притупление режущих кромок алмазного круга. Подготовленный таким способом к работе алмазный круг обеспечивал шероховатость обработки $R_a = 0,1 \dots 0,2$ мкм. Следовательно, притупление режущих кромок алмазного круга позволило уменьшить параметр шероховатости обработки R_a с 3,0 мкм до 0,1...0,2 мкм, то есть в 15...30 раз.

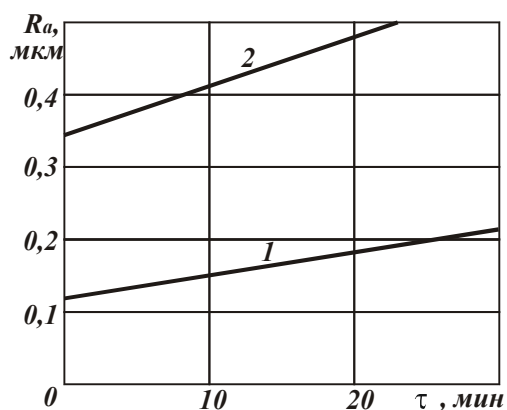


Рис. 2. Зависимость параметра R_a от времени шлифования τ сплошной (1) и прерывистой (2) поверхностей.

Опытами, проведенными в течении 30 минут шлифования, установлено, что алмазный круг с притупленными режущими кромками обладает высокой размерной стойкостью. Это позволяет использовать его на чистовых операциях шлифования для обеспечения высоких показателей шероховатости и точности обработки, что открывает новые технологические возможности шлифования. По сути, одним алмазным кругом можно одновременно снимать относительно большие припуски с высокой производительностью и обеспечивать шероховатость поверхности на уровне операций чистовой обработки.

Заслуживает внимания тот факт, что добиться существенного уменьшения параметра шероховатости R_a нам удалось при круглом наружном шлифовании сплошной поверхности. При круглом наружном шлифовании прерывистой поверхности (твердосплавной развертки) после притупления режущих кромок круга параметр шероховатости R_a уменьшился лишь до значения 0,35 мкм. Через 30 минут работы параметр R_a увеличился до значения 0,5...0,6 мкм (рис. 2). Это связано с ударным характером взаимодействия обрабатываемых ножей развертки с алмазным кругом и достаточно интенсивным восстановлением режущей способности круга, а так же с появлением в технологической системе вынужденных колебаний, обусловленных периодичностью контакта обрабатываемых ножей развертки с кругом.

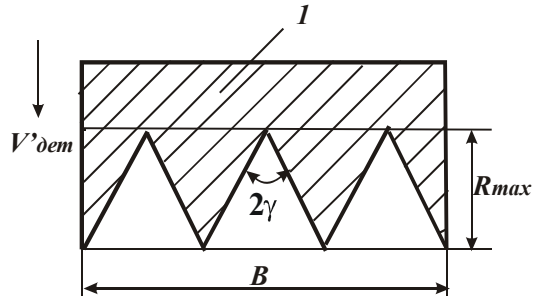


Рис. 3. Схема образования шероховатости поверхности: 1 – обрабатываемый материал.

шт/м²; $L = V_{кр} \cdot \tau$ - длина участка круга, на котором расположено n зерен, м; $V_{кр}$ - скорость круга, м/с; τ - время, в течении которого n зерен проконтактировали с диаметральной плоскостью круга, с.

Разрешая зависимость (2) относительно параметра R_{max} , имеем

$$R_{max} = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n} \quad (3)$$

Если диаметральной плоскостью круга перемещается со скоростью V'_{dem} по нормали к кругу, то время τ выражается зависимостью

$$\tau = \frac{R_{max}}{V'_{dem}} \quad (4)$$

Подставляя зависимость (4) в (3), после преобразований, получим:

$$R_{max} = \sqrt{\frac{V'_{dem}}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}} \quad (5)$$

Данный расчет справедлив для одновысотного выступания вершин зерен над уровнем связки круга. Чтобы учесть разновысотное выступание вершин зерен над уровнем связки, необходимо поверхностную концентрацию вершин зерен k умножить на коэффициент R_{max}/b , где b - максимальная высота вершин зерен над уровнем связки круга, м. Тогда зависимость (5) примет вид

$$R_{max} = \sqrt[3]{\frac{V'_{dem} \cdot b}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}} \quad (6)$$

С учетом приведенных в работе [1] соотношений

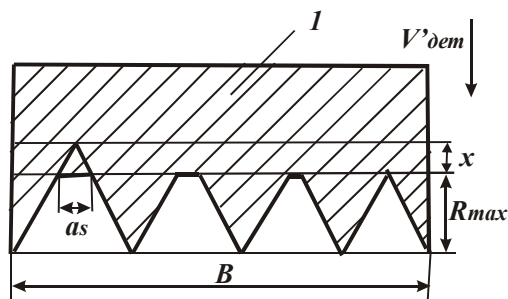
$$b = \bar{X} \cdot (1 - \varepsilon), \quad (7)$$

$$k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2} \quad (8)$$

(где \bar{X} - зернистость круга, м; m - объемная концентрация зерен круга; $(1 - \varepsilon)$ - коэффициент, определяющий степень выступания зерен над уровнем связки, изменяется в пределах 0...1), зависимость (6) опишется

$$R_{max} = \bar{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{100 \cdot \pi}{3 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot m} \cdot \frac{V'_{dem}}{V_{кр}}} \quad (9)$$

Рис. 4. Схема образования шероховатости поверхности с учетом износа зерен круга: 1 – обрабатываемый материал.



Рассмотрим расчетную схему, учитывающую износ зерен круга. Для упрощения расчетов предположим, что режущие зерна в связи с их разновысотным выступанием над уровнем связки круга изношены на разную величину, рис. 4. Наибольшую “площадку износа” длиной a имеет наиболее выступающее из связки

зерно, а наименьшую – наименее выступающее из связки зерно, которое участвует в формировании шероховатости поверхности. Условие для определения параметра шероховатости R_{max} принимает вид:

$$2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot R_{max} \cdot n + \sum a_S = B, \quad (10)$$

где $\sum a_S = \int_0^a a_S \cdot dn$ - сумма длин “площадок износа” всех работающих зерен; a_S - текущее значение длины “площадки износа” зерна; $dn = n \cdot f(a_S) \cdot da_S$; $f(a_S)$ - плотность распределения длин “площадок износа” зерен a_S .

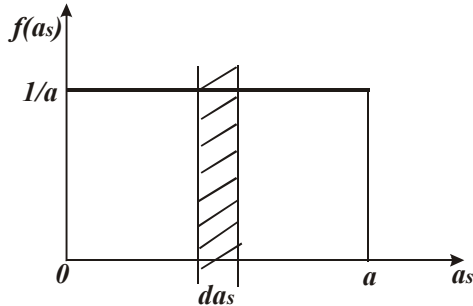


Рис. 5. Вид функции $f(a_S)$.

Принимая равномерный закон распределения длин “площадок износа” зерен, функция $f(a_S)$ описывается (рис. 5):

$$f(a_S) = \frac{1}{a}. \quad (11)$$

Такой вид функции $f(a_S)$ обусловлен тем, что согласно теории вероятностей, площадь, ограниченная осями ОХ, ОУ и прямыми $f(a_S) = \frac{1}{a}$ и $a_S = a$, равна единице.

После интегрирования сумма $\sum a_S$ определится:

$$\sum a_S = \int_0^a a_S \cdot \frac{n}{a} \cdot da_S = 0,5 \cdot a \cdot n. \quad (12)$$

Количество зерен n выражается зависимостью:

$$n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau, \quad (13)$$

где $k = k_0 \cdot \frac{(x + R_{max})}{b}$; $k_0 = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}$; x - величина линейного износа наиболее выступающего из связки зерна ($x = \Delta$).

Подставляя зависимости (12) и (13) в условие (10), имеем

$$(x + R_{max}) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot R_{max} + 0,5 \cdot a) = \frac{b}{k_0 \cdot V_{кр} \cdot \tau}. \quad (14)$$

После преобразований с учетом $a = 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot x$, получим

$$R_{max}^2 + \frac{3 \cdot x}{2} \cdot R_{max} + \left(\frac{x^2}{2} - \frac{b}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k_0 \cdot V_{кр} \cdot \tau} \right) = 0. \quad (15)$$

В результате получено квадратное уравнение относительно неизвестной величины R_{max} . Его решение:

$$R_{max} = -\frac{3 \cdot x}{4} + \sqrt{\frac{x^2}{16} + \frac{b}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k_0 \cdot V_{кр} \cdot \tau}}. \quad (16)$$

Зависимость (16) может быть представлена в виде:

$$\left(R_{max} + \frac{3 \cdot x}{4} \right)^2 - \frac{x^2}{16} = \frac{b}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k_0 \cdot V_{кр} \cdot \tau} \quad (17)$$

или после преобразований с учетом зависимостей (7), (8):

$$\left(R_{max} + \frac{3 \cdot x}{4} \right)^2 - \frac{x^2}{16} = \frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3}{3 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot \tau}. \quad (18)$$

Используя зависимость (18), можно рассчитать параметр шероховатости обработки R_{max} для различных кинематических схем шлифования с учетом износа зерен круга.

Первоначально проведем анализ шероховатости обработки при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью $V'_{дем}$. Тогда время формирования шероховатости обработки выразится: $\tau = R_{max} / V'_{дем}$, зависимость (18) примет вид:

$$\left[\left(R_{max} + \frac{3 \cdot x}{4} \right)^2 - \frac{x^2}{16} \right] \cdot R_{max} = \frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V'_{dem}}{3 \cdot \text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} . \quad (19)$$

Принимая обозначение $\bar{R}_{max} = \sqrt[3]{\frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V'_{dem}}{3 \cdot \text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр}}}$, имеем

$$\left[\left(R_{max} + \frac{3 \cdot x}{4} \right)^2 - \frac{x^2}{16} \right] \cdot R_{max} = \bar{R}_{max}^3 , \quad (20)$$

где \bar{R}_{max} - параметр шероховатости обработки, полученной без учета износа зерен.

Из зависимости (20) следует уменьшение параметра R_{max} с увеличением величины линейного износа зерна x . Расчетами установлено, например, что для $\bar{R}_{max} = 1$ мкм (соответственно $x = 0$) при $x = 4$ мкм параметр шероховатости обработки равен $R_{max} = 0,125$ мкм. Как видим, величина x оказывает существенное влияние на параметр R_{max} , то есть за счет увеличения величины x можно добиться значительного уменьшения параметра R_{max} , что имеет большое практическое значение.

Поскольку с увеличением x параметр R_{max} уменьшается и становится значительно меньше величины x , в левой части зависимости (19) можно пренебречь слагаемым R_{max} . Тогда зависимость упростится и примет вид:

$$R_{max} = \frac{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V'_{dem}}{3 \cdot \text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot x^2} . \quad (21)$$

Из зависимости (21) явно следует существенное влияние величины x на параметр R_{max} .

При плоском шлифовании время формирования шероховатости поверхности τ определяется зависимостью:

$$\tau = \frac{l}{V_{dem}} , \quad (22)$$

где l - длина отрезка на круге, определяющего параметр шероховатости R_{max} ; $l = 2 \cdot \sqrt{D_{кр} \cdot R_{max}}$; $D_{кр}$ - диаметр круга, м; V_{dem} - скорость детали, м/с.

Подставляя (22) в зависимость (18), получим

$$\left[\left(R_{max} + \frac{3 \cdot x}{4} \right)^2 - \frac{x^2}{16} \right] \cdot \sqrt{R_{max}} = \frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{dem}}{6 \cdot \text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{D_{кр}}} . \quad (23)$$

Пренебрегая в левой части зависимости (23) слагаемым R_{max} (так как $x \gg R_{max}$), получим упрощенную зависимость для определения параметра R_{max} :

$$R_{max} = \left(\frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{dem}}{6 \cdot \text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{D_{кр}}} \right)^2 \cdot \frac{4}{x^4} . \quad (24)$$

В данном случае влияние условий шлифовании на параметр R_{max} еще больше, чем в зависимости (21), полученной для шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга.

При шлифовании алмазным кругом алмазного карандаша износ алмазных зерен круга может происходить без образования на них "площадок износа", то есть режущая часть зерна будет сохранять свою начальную форму, например, форму конуса с углом при вершине 2γ . В этом случае режущие зерна будут выступать над уровнем связки круга приблизительно на одну и ту же высоту. Расчет параметра шероховатости обработки R_{max} при шлифовании по первой схеме будет состоять в том, что в зависимости (5) поверхностную концентрацию зерен k необходимо умножить не на коэффициент R_{max}/b , а на коэффициент $(R_{max} + x)/b$, где x - величина линейного износа наиболее выступающего из связки зерна ($x = \Delta$). Тогда зависимость (5) примет вид

$$R_{max}^2 \cdot (R_{max} + x) = \frac{b \cdot V'_{dem}}{2 \text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}} . \quad (25)$$

При $x=0$ приходим к зависимости (5). При $x > R_{max}$ зависимость (25) упростится:

$$R_{max} = \sqrt{\frac{b \cdot V'_{dem}}{2 \cdot tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot x}}, \quad (26)$$

а с учетом соотношений (7) и (8) примет окончательный вид

$$R_{max} = \sqrt{\frac{100\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V'_{dem}}{3 \cdot tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot x}}. \quad (27)$$

С увеличением величины x параметр шероховатости обработки R_{max} уменьшается, однако, с меньшей интенсивностью, чем в зависимости (21). Используя зависимость (9) преобразуем зависимость (26):

$$R_{max} = \sqrt{\frac{\bar{R}_{max}^{-3}}{x}}, \quad (28)$$

где \bar{R}_{max} - значение параметра R_{max} для $x=0$.

Аналогичным образом установим зависимость для определения параметра R_{max} для плоского шлифования. Для этого исходную зависимость (3) представим в виде:

$$R_{max} = \frac{1}{2tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot \tau}. \quad (29)$$

Время формирования шероховатости поверхности τ выразим зависимостью: $\tau = 2 \cdot \sqrt{D_{кр} \cdot R_{max}} / V_{dem}$, а поверхностную концентрацию зерен k умножим на коэффициент $(R_{max} + x) / b$. Тогда зависимость (29) выразится

$$R_{max}^{1,5} \cdot (R_{max} + x) = \frac{b \cdot V_{dem}}{4tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{D_{кр}}}. \quad (30)$$

С учетом соотношений (7) и (8) зависимость (30) примет окончательный вид

$$R_{max} = \left(\frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{dem}}{6 \cdot tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{D_{кр}} \cdot x} \right)^{0,67}. \quad (31)$$

В отличие от аналогичной зависимости (24), в зависимость (31) величина x входит в значительно меньшей степени. Преобразуем зависимость (31) с учетом параметра \bar{R}_{max} , определяющего шероховатость обработки для случая $x=0$:

$$R_{max} = \left(\frac{\bar{R}_{max}^{-2,5}}{x} \right)^{0,67}. \quad (32)$$

Подставляя в зависимости (24) и (31) экспериментальные значения x и R_{max} , можно оценить, какая из двух вышерассмотренных расчетных схем более достоверно отражает закономерности формирования шероховатости обработки.

Литература

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.
2. Новиков Ф.В., Ткаченко В.П. Кинематика формообразования торцевой поверхности вращающегося кольца при шлифовании. – Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. – Труды 7-й Межд. научн. - техн. конф., 27-28 мая 2003 г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2003. – С. 29-33.
3. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.