

А.В. ШИРОКОВ, инженер, Сф СамГТУ, Сызрань, Россия;
А.П. ОСИПОВ, канд. техн. наук, доцент, декан механического факультета, Сф СамГТУ, Сызрань, Россия

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ШЛИФОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ ЯВЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ОТТЕСНЕНИЯ МЕТАЛЛА АБРАЗИВНЫМИ ЗЕРНАМИ

У статті представлений висновок залежності параметра шорсткості R_{\max} шліфованої поверхні від основних параметрів, що характеризують процес мікрорізання на основі математичного моделювання взаємодії ріжучої крайки абразивного зерна з оброблюваним матеріалом. Проведено аналіз отриманої залежності. Визначено напрямок зміни шорсткості шліфованої поверхні при зміні умов мікрорізання (царапанія). Зроблено висновки по проробленій роботі.

В статье представлен вывод зависимости параметра шероховатости R_{\max} шлифованной поверхности от основных параметров, характеризующих процесс микрорезания на основе математического моделирования взаимодействия режущей кромки абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Проведен анализ полученной зависимости. Определено направление изменения шероховатости шлифованной поверхности при изменении условий микрорезания (царапания). Сделаны выводы по проделанной работе.

On the basis of mathematical modelling of interaction of the cutting edge of abrasive grain with the processed material, the deduction of dependence of ground surface roughness parameter R_{\max} on key parameters of microcutting process is presented in this article. The analysis of the received dependence is carried out. The change direction of the roughness of ground surface is defined at change of conditions of microcutting. Conclusions are drawn.

Основные обозначения и сокращения

АЗ – абразивное (или алмазное) зерно;
РК – режущая кромка;
РП – рабочая поверхность;
ТС – технологическая система;
ШК – шлифовальный круг.

Введение

Для надежной работы детали в изделии большое значение имеет шероховатость обработанных поверхностей. Общеизвестно [0, 0], что шероховатость определяет многие процессы, происходящие в поверхностном слое, и формируется на финишных операциях механической обработки. Одним из основных методов окончательной обработки поверхностей является шлифование.

Формированию шероховатости шлифованной поверхности уделялось большое внимание со стороны отечественных и зарубежных ученых. Анализ литературных источников показал, что имеющиеся зависимости являются в основном эмпирическими [0, 0]. Имеющиеся теоретические модели

образования микронеровностей [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0] зачастую сложны и при этом не обеспечивают высокой точности прогнозирования параметров шероховатости шлифованной поверхности. Многие из этих моделей содержат эмпирические коэффициенты, которые отражают влияние неучтенных факторов.

Шлифованная поверхность представляет собой совокупность шлифовочных рисков. Каждая риска представляет собой совокупность канавки и навалов, образующихся в результате пластического оттеснения металла к ее краям [0, 0, 0]. Согласно исследованиям, проведенным на установках для микрорезания единичным абразивным зерном [0, 0], навалы увеличивают высоту риски на 20-80%.

В ходе исследований был проведен анализ некоторых математических моделей образования единичной риски-царапины [0, 0, 0]. С их помощью ученые пытались оценить шероховатость всей шлифованной поверхности. Основным достоинством этой группы моделей является их простота. Вместе с тем они имеют ряд существенных недостатков.

Во-первых, они базируются на моделях РК АЗ в виде конуса с округленной вершиной. Аппроксимирование РК АЗ сферой или конусом с округленной вершиной, на наш взгляд, является приближенным. Параметры аппроксимации (угол при вершине конуса ε и радиус округления его вершины ρ) довольно сильно изменяются в зависимости от глубины микрорезания. Определение их средних значений приводит к значительным погрешностям в определении параметров шероховатости.

Во-вторых, для оценки высоты навалов с помощью теоретических моделей микрорезания [0, 0, 0] необходимы эксперименты по определению исходных данных (коэффициента навалов, относительной критической глубины внедрения РК АЗ в обрабатываемый материал и др.). Иными словами, использование существующих теоретических моделей не освобождает исследователя (инженера) от проведения экспериментальных исследований.

Таким образом, анализ существующих моделей процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности показал, что в настоящее время проблема прогнозирования и обеспечения параметров шероховатости шлифованной поверхности полностью не решена.

Цель работы. Разработка аналитической модели образования единичной риски-царапины, которая может быть использована для предварительной количественной оценки ожидаемой высоты микронеровностей шлифованной поверхности.

Задачи. 1) Выбрать модель РК АЗ; 2) Разработать математическую модель процесса формирования поперечного профиля единичной риски

(царапины); 3) Исследовать полученные зависимости; 4) Сделать выводы по проделанной работе.

В рамках представленной работы приняты следующие **допущения**. 1) ТС является абсолютно жесткой. 2) Весь деформируемый и не переходящий при микрорезании в стружку материал выдавливается в направлениях, перпендикулярных вектору скорости резания, и образует по бокам канавки два навала. 3) Навалы в поперечном сечении имеют форму полукругов.

Логично предположить, что АЗ, внедрившееся на бóльшую глубину, выдавит бóльший объем материала и образует канавку с бóльшими по высоте навалами. Следовательно, самые высокие риски (царапины) формируются наиболее выступающими зернами ШК. На наш взгляд, высоту этих рисков можно использовать для оценки параметра R_{\max} шлифованной поверхности:

$$R_{\max} = t_k + h_{\text{Hmax}}, \quad (1)$$

где t_k – максимальная глубина шлифовочной канавки, h_{Hmax} – высота (радиус) навалов.

Исследования [0, 0, 0] показали тесную корреляционную связь параметров шероховатости шлифованной поверхности:

$$R_{\max} = (6,7 \dots 7,0) \cdot R_a [0, 0], \quad (2)$$

$$R_z = (5,5 \dots 6) \cdot R_a [0, 0], \quad (3)$$

$$S_m = 57,5 \cdot \sqrt{R_a} [0, 0], \quad (4)$$

$$\beta = 17,5 \cdot R_a^{0,8} \quad (0,1 \leq R_a \leq 3,0) [0]. \quad (5)$$

Выразим параметры шероховатости в уравнениях (2)-(5) через R_{\max} :

$$R_a = \frac{R_{\max}}{6,7 \dots 7}, \quad (6)$$

$$R_z = (0,79 \dots 0,90) \cdot R_{\max}, \quad (7)$$

$$S_m = 22,2 \cdot \sqrt{R_{\max}}, \quad (8)$$

$$\beta = 3,69 \cdot R_{\max}^{0,8} \quad (0,7 \leq R_{\max} \leq 21,0). \quad (9)$$

Некоторые ученые [0, 0] вместо первого слагаемого в формуле (1) использовали наибольшую высоту неровностей микропрофиля (продольного [0] и поперечного [0]) R_{\max} , формируемого без учета образования навалов по краям шлифовочных рисков. При этом В.И. Островский [0] отмечает в своей работе, что практическое использование полученных им зависимостей затруднено. То же самое можно сказать и о зависимостях С.Г. Бишутина [0].

Глубину канавки t_k для расчета параметра R_{\max} в первом приближении, действительно, можно принять равной максимальной толщине среза $a_{z_{\max}}$ [0, 0], поскольку этот параметр характеризует максимальную глубину внедрения режущих кромок зерен РП ШК в обрабатываемый материал.

$$t_k = a_{z \max},$$

$$R_{\max} = a_{z \max} + h_{n \max}. \quad (10)$$

В своих исследованиях ученые зачастую пытались получить выражение для средней толщины среза $a_{z \text{cp}}$ [0, 0, 0]. Формул для определения максимальной толщины среза значительно меньше. Согласно Е.Н. Маслову [0]:

$$a_{z \max} = 2 \cdot a_{z \text{cp}}, \quad (11)$$

$$a_{z \text{cp}} = \frac{v_d}{60 \cdot v_{\text{кр}} \pm 2 \cdot v_d} \cdot \sqrt{t_{\phi}} \cdot l_{\phi} \cdot \sqrt{\frac{1}{D} + \frac{\alpha}{d}} \cdot \frac{s}{B}, \quad (12)$$

где $v_{\text{кр}}$ – скорость ШК; v_d – скорость детали; s – продольная подача ШК; t_{ϕ} – фактическая глубина резания; l_{ϕ} – среднее расстояние между режущими кромками; D – диаметр ШК; B – высота ШК; d – диаметр детали; α – коэффициент, который принимает следующие значения: 1 – для наружного круглого шлифования; -1 – для внутреннего шлифования; 0 – для плоского шлифования. Знак «+» в формуле (12) соответствует встречному шлифованию, знак «-» – попутному.

Задача определения максимальной высоты навалов $h_{n \max}$ (второго слагаемого в формуле (1)), на наш взгляд, еще не решена и по-прежнему актуальна. Ее решение позволит определить параметры шероховатости шлифованной поверхности с учетом упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала.

1.1 Выбор модели режущей кромки абразивного зерна

Представим РК АЗ параболоидом вращения [0] с уравнением в прямоугольной системе координат $z^2 + x^2 = b^2 \cdot y^{2 \cdot v}$. Ось Z направим в сторону вектора скорости резания \vec{V} , ось Oy – нормально обрабатываемой поверхности, ось Ox – перпендикулярно этим осям, начало координат O поместим в вершину РК (рис. 1). Параметры v и b характеризуют форму образующей РК. Кроме того, для характеристики ее геометрии введем параметр $h_{\text{изн}}$, определяющий линейный износ.

1.2 Разработка модели процесса формирования поперечного профиля единичной риски

Введем в рассмотрение угол сдвига β_1 , определяющий направление скольжения слоев обрабатываемого материала в момент отрыва [0]. Согласно исследованиям авторов статьи угол β_1 определяется по следующей формуле:

$$\beta_1 = \arctg \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right)}$$

где $[\delta]$ и $[\psi]$ – относительное удлинение и сужение обрабатываемого материала соответственно, в долях.

Рассмотрим профиль РК в произвольной плоскости β , параллельной центральной (фронтальной) плоскости ZOY (рис. 1). Проведем касательную под углом β_1 к переднему профилю РК. Точку касания обозначим через B . Таким образом, получим разделение переднего профиля на две части. Проводя подобные построения в других плоскостях, параллельных плоскости ZOY , можно получить разделение всей передней поверхности на две зоны (зоны 1 и 2 на рис. 1). Будем полагать, что материал, контактирующий с зоной 1, будет удаляться в виде стружки. Материал, контактирующий с зоной 2, срезаться не будет, поскольку движущееся зерно будет «подминать» его под себя.

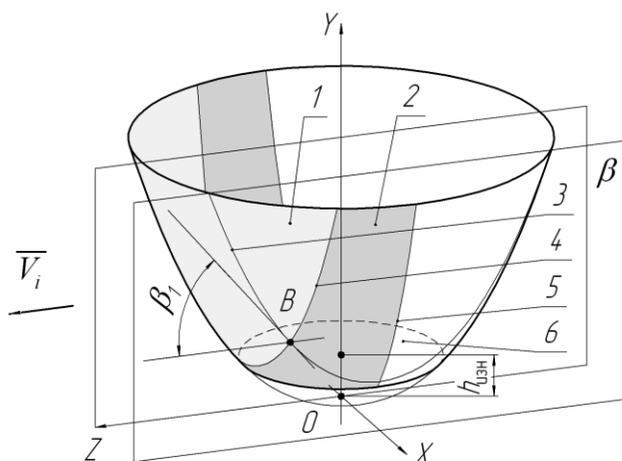


Рисунок 1 – Предлагаемая модель РК АЗ

1 - зона резания; 2 - зона выдавливания; 3 – профиль РК в плоскости β ; 4 – линия разделения передней поверхности РК на зоны; 5 – линия разделения РК на переднюю и заднюю поверхности; 6 – площадка износа

Рассмотрим процесс микрорезания (царапания) режущей кромкой i -го зерна ШК с вершиной M_i (рис. 2) в произвольной плоскости α , нормальной к обрабатываемой поверхности. Участок траектории движения РК, соответствующий одному внедрению в обрабатываемый материал, обозначим AB . Участок траектории, соответствующий прохождению через плоскость α , обозначим CE .

Анализ реальных условий шлифовальных операций, применяемых в качестве финишных (окончательных) при обработке деталей машин, показал, что в большинстве случаев

$$t_M \ll R_{кр},$$

$$t_M \ll R_d,$$

$$S_M \ll V_{кр},$$

где t_M – глубина микрорезания – наибольшая глубина внедрения РК в обрабатываемый материал за одно врезание, $R_{кр}$ и R_d – радиус ШК и детали соответственно, $V_{кр}$ – скорость ШК, S_M – минутная продольная подача (случай цилиндрического шлифования). Первое условие справедливо для всех видов шлифования; второе – для цилиндрического; третье – для цилиндрического с продольной подачей. Из первых двух условий следует, что $CE \ll AB$. В таком случае можно принять, что глубина внедрения РК на участке CE постоянна. Опираясь на приведенные условия можно также принять, что при движении вершины РК M_i из точки C в точку E вектор ее скорости \vec{V}_i перпендикулярен плоскости α .

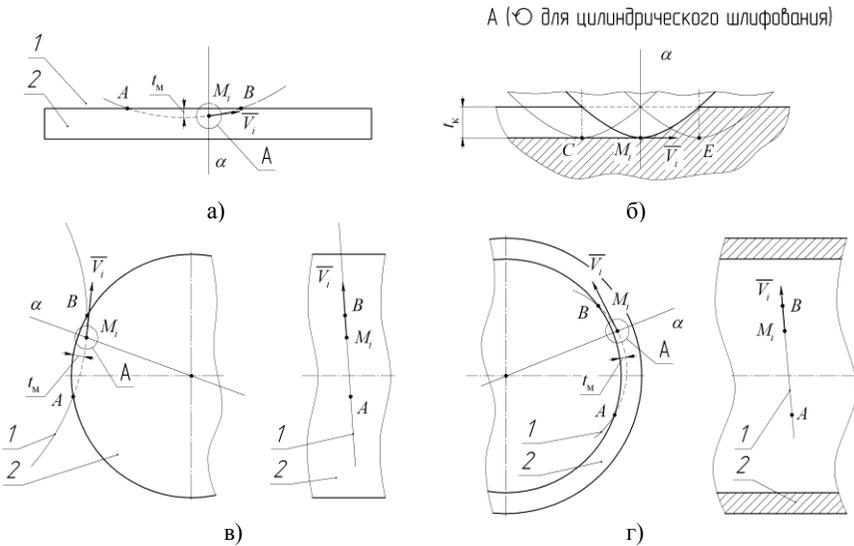


Рисунок 2 – Процесс микрорезания относительно детали при различных видах шлифования: а – плоское шлифование; б – вид А; в – наружное цилиндрическое шлифование с продольной подачей; г – внутреннее цилиндрическое шлифование с продольной подачей; 1- траектория движения РК i -го зерна относительно детали при микрорезании (циклическая кривая); 2 – деталь

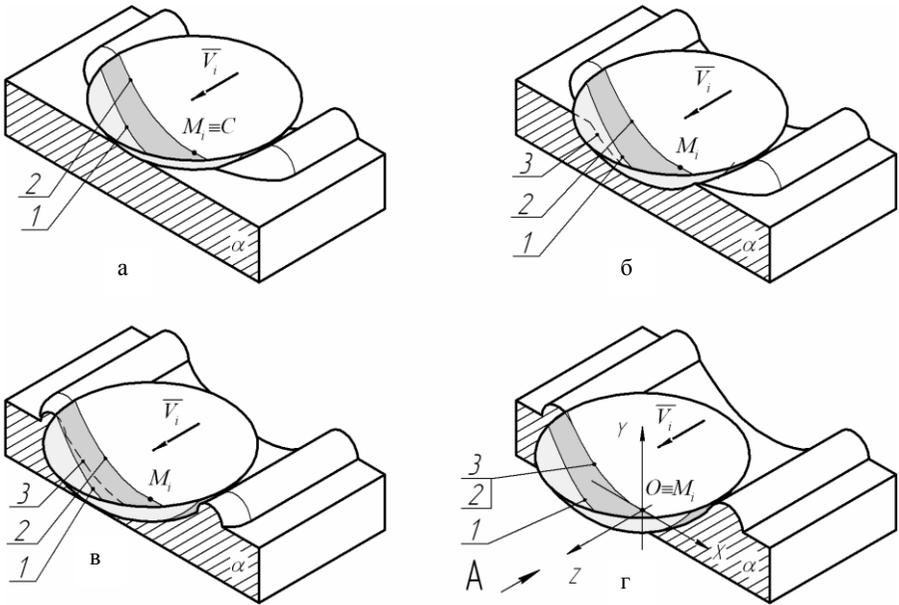


Рисунок 3 – Процесс формирования единичной риски (царапины)
 1 - зона резания; 2 - зона выдавливания; 3 – профиль РК в плоскости α

Рассмотрим процесс образования навалов в плоскости α при движении через нее РК (рис. 3, а). Навалы начинают формироваться в момент контакта зоны выдавливания РК с обрабатываемым материалом (рис. 3, б). По мере движения зоны выдавливания через плоскость α размер навалов увеличивается (рис. 3, в). При этом в соответствии с принятым в начале статьи 3-им допущением высоту (радиус) навала h_n можно определить через его площадь S_n :

$$h_n = \sqrt{\frac{2 \cdot S_n}{\pi}}$$

В соответствии с принятым ранее 2-ым допущением

$$2 \cdot S_n = 2 \cdot S_y, \quad (13)$$

$$h_n = \sqrt{\frac{2 \cdot S_y}{\pi}},$$

где S_y - площадь материала в плоскости α , контактировавшего с зоной выдавливания. По мере движения режущей кромки размеры навалов в плоскости α будут увеличиваться. Навалы достигнут максимальных

размеров, когда вся зона выдавливания пройдет через плоскость α и в ней окажется вершина РК M_i (рис. 3, г):

$$h_{i \max} = \sqrt{\frac{2 \cdot S_{y \max}}{\pi}}. \quad (14)$$

Задача по нахождению параметра $S_{y \max}$ сводится к вычислению определенных интегралов. Пределы интегрирования и вид выражения меняются в зависимости от условий резания (рис. 4):

$$S_{y \max} = \begin{cases} \int_{t_K + h_{\text{ИЗН}}}^{t_K + h_{\text{ИЗН}}} f(y) dy, & t_K + h_{\text{ИЗН}} \leq y_{\min}; \\ \int_{h_{\text{ИЗН}}}^{t_K + h_{\text{ИЗН}}} f(y) dy - \int_{h_{\text{ИЗН}}}^{t_K + h_{\text{ИЗН}}} x(y) dy, & h_{\text{ИЗН}} \geq y_{\min}; \\ \int_{h_{\text{ИЗН}}}^{t_K + h_{\text{ИЗН}}} f(y) dy - \int_{y_{\min}}^{t_K + h_{\text{ИЗН}}} x(y) dy, & \begin{cases} h_{\text{ИЗН}} < y_{\min}; \\ t_K + h_{\text{ИЗН}} > y_{\min}. \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

где $f(y)$ - уравнение профиля режущей кромки в центральной плоскости XOY :

$$f(y) = b \cdot y^v,$$

$x(y)$ - уравнение проекции на плоскость XOY линии разделения передней поверхности на зоны [0]:

$$x(y) = \sqrt{b^2 \cdot y^{2v} - (tg(\beta_1) \cdot b \cdot v \cdot y^{2v-1})^2}, \quad (16)$$

y_{\min} - минимальная глубина внедрения неизношенной РК ($h_{\text{ИЗН}}=0$), при которой начнется процесс снятия стружки [0]:

$$y_{\min} = (tg(\beta_1) \cdot b \cdot v)^{1/(1-v)}.$$

В общем случае минимальная глубина внедрения РК $t_{K \min}$, при которой начнется процесс снятия стружки (рис. 4):

$$t_{K \min} = \begin{cases} y_{\min} - h_{\text{ИЗН}}, & y_{\min} > h_{\text{ИЗН}}; \\ 0, & y_{\min} \leq h_{\text{ИЗН}}. \end{cases}$$

Если величина линейного износа РК $h_{\text{ИЗН}}$ превышает величину y_{\min} ($y_{\min} \leq h_{\text{ИЗН}}$), то процесс микрорезания будет иметь место при любой глубине внедрения РК в обрабатываемый материал.

Первому уравнению в системе (15) соответствует случай, при котором имеет место только процесс выдавливания материала (рис. 4,а). Второму и третьему уравнению системы (15) соответствуют случаи взаимодействия РК с

обрабатываемым материалом, показанные на рис. 4,б и 4,в. В этих случаях образуется стружка.

Упростим систему (15). Анализ значений функции (16) при различных значениях исходных данных (v, b, β_1) показал, что $x(y) \approx f(y - y_{\min})$, и

$$\int_{y_1}^{y_2} x(y) dy \approx \int_{y_1}^{y_2} f(y - y_{\min}) dy. \quad (17)$$

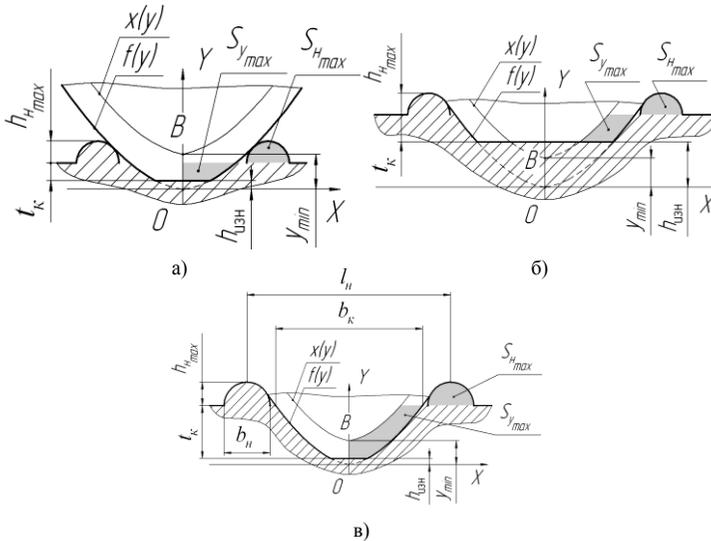


Рисунок 4 – Различные случаи взаимодействия РК с обрабатываемым материалом в плоскости α (вид А на рис. 3, г)

Используя равенство (17), произведем замену в системе (15)

$$S_{y_{\max}} = \begin{cases} \int_{t_k + h_{\text{изн}}}^{t_k + h_{\text{изн}}} f(y) dy, & t_k + h_{\text{изн}} \leq y_{\min}; \\ \int_{t_k + h_{\text{изн}}}^{t_k + h_{\text{изн}}} f(y) dy - \int_{t_k + h_{\text{изн}}}^{t_k + h_{\text{изн}}} f(y - y_{\min}) dy, & h_{\text{изн}} \geq y_{\min}; \\ \int_{t_k + h_{\text{изн}}}^{t_k + h_{\text{изн}}} f(y) dy - \int_{y_{\min}}^{t_k + h_{\text{изн}}} f(y - y_{\min}) dy, & \begin{cases} h_{\text{изн}} < y_{\min}; \\ t_k + h_{\text{изн}} > y_{\min}. \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

Расхождение результатов, полученных с помощью систем (15) и (18), не превышает 5%.

1.3 Анализ влияния параметров микрорезания на высоту навалов и шероховатость шлифованной поверхности

В ходе данного анализа определялось направление изменения высоты навалов $h_{H_{\max}}$ и параметра шероховатости R_{\max} при изменении условий микрорезания. Исследования проводились в среде математического пакета MathCAD. При этом параметрам микрорезания присваивались следующие значения.

- $v \in [0; 1]$, $b \in [0,5; 30]$. Такие значения были получены при исследовании фотографий абразивных зерен $[0, 0, 0]$.
- $h_{\text{изн}} \in [0; 20]$, мкм.
- $t_k \in [0; 50]$, мкм, $[0]$. Глубина шлифовочной канавки не может превышать предельную толщину среза. В противном случае зерно будет разрушено.

Из формул (6)-(9) следует, что параметры шероховатости шлифованной поверхности R_a , R_z , S_m , β увеличиваются с увеличением параметра R_{\max} . Параметр R_{\max} , в свою очередь, увеличивается при увеличении глубины микрорезания t_k наиболее выступающими режущими кромками зерен ШК (формула (1)), под которыми будем понимать те, вершины которых наиболее удалены от оси ШК.

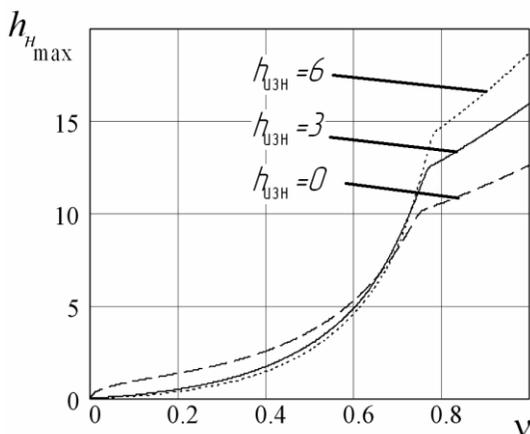


Рисунок 5 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности R_{\max} от геометрического параметра РК v при различных значениях ее износа $h_{\text{изн}}$ ($b=5$, $t_k=10$ мкм, $\beta_1=25^\circ$)

Из формул (14) и (18) следует, что увеличение геометрического параметра b РК, глубины ее внедрения в обрабатываемый материал t_k и угла сдвига β_1 ведет к увеличению высоты навалов $h_{n\max}$.

Для определения влияния геометрического параметра v и износа РК $h_{\text{изн}}$ построим график зависимости $h_{n\max}(v)$ при различных значениях износа $h_{\text{изн}}$ (рис. 6). Из графика видно, что с увеличением параметра v высота навалов $h_{n\max}$ увеличивается. Влияние линейного износа неоднозначно: износ РК, характеризуемой значением $v < 0,7$, ведет к уменьшению высоты навалов $h_{n\max}$; износ РК, характеризуемой значением $v > 0,7$, ведет к увеличению высоты навалов $h_{i\max}$.

Выводы

1. Использование существующих теоретических моделей образования единичной риски-царапины $[0, 0, 0]$ не освобождает исследователя (инженера) от проведения экспериментов с целью определения исходных данных (коэффициента навалов, относительной критической глубины внедрения РК АЗ в обрабатываемый материал и др.).

2. Аппроксимирование РК АЗ сферой или конусом с округленной вершиной является приближенным. Параметры аппроксимации (угол при вершине конуса ε и радиус округления его вершины ρ) довольно сильно изменяются в зависимости от глубины микрорезания. Лучшее приближение дает аппроксимация в виде параболоида вращения $[0, 0]$.

3. Выбранная математическая модель РК и разработанная математическая модель образования единичной риски, на наш взгляд, более точно отражают реальный процесс микрорезания: учитывается как собственно резание, так и упругопластическая деформация, а также износ режущей кромки.

4. Установлено, что увеличение геометрических параметров режущих кромок v и b , глубин их внедрения в обрабатываемый материал t_k , угла сдвига β_1 ведет к увеличению шероховатости шлифованной поверхности. Влияние линейного износа $h_{\text{изн}}$ зависит от значений геометрического параметра v . Износ режущих кромок, характеризуемых значениями $v < 0,7$, способствует уменьшению шероховатости, а износ режущих кромок, характеризуемых значениями $v > 0,7$, способствует увеличению шероховатости шлифованной поверхности.

5. Дальнейшим этапом исследований видится оценка адекватности разработанной теоретической модели взаимодействия единичных абразивных зерен с обрабатываемым материалом в результате проведения экспериментов по микрорезанию пластин-образцов единичной РК.

Список литературы: 1. Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании / С.Г. Бишутин. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 144с.: ил. - ISBN 5-94275-128-5. 2. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей / Н.Б. Демкин. – М.: Наука, 1970. – 227 с. 3. Дрябов А.Н. Программа для анализа режущих кромок абразивных зерен «GrainLab» / А.Н. Дрябов, А.П. Осипов // Научно-техническое творчество: проблемы и перспективы. Сборник статей всероссийской науч.-технич. конф.-семинара / Филиал ГОУ ВПО СамГТУ в г. Сызрани – Самара, 2006. – С. 58-61. - ISBN 5-7964-0880-1. 4. Зубарев Ю.М. Моделирование процесса плоского шлифования однослойными эльборовыми кругами / Ю.М. Зубарев, И.Д. Теннисон // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сб. статей междунар. науч.-технич. конф. «Шлифабразив-2001» / Волжский инж.-строит. институт, филиал ВолгГАСА – Волжский, 2001. – С. 284-286. 5. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. - М.: Машиностроение, 1974 – 280 с. 6. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. - М.: Машиностроение, 1974.- 320 с. 7. Маслова А.Ю. О методике определения геометрических параметров абразивной режущей кромки / А.Ю. Маслова, А.П. Осипов, В.В. Федотов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сб. статей междунар. науч.-технич. конф. «Шлифабразив-2006» / Волжский институт строительства и технологий, филиал ВолгГАСУ – Волжский, 2006. – С.74-77. 8. Никифоров И.П. Стохастическая модель процесса шлифования / И.П. Никифоров // Известия вузов. Машиностроение. – 2003. - №6. – С. 64-72. 9. Носенко В.А. Методика расчета распределения вершин зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и параметров шероховатости обработанной поверхности / В.А. Носенко, Е.В. Федотов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сб. статей междунар. науч.-технич. конф. «Шлифабразив-2004» / Волжский институт строительства и технологий, филиал ВолгГАСУ – Волжский, 2004. – С.51-54. 10. Носов Н.В. Абразивная обработка деталей инструментами из СВС-материалов / Н.В. Носов. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2005. – 362 с. 11. Носов Н.В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулирования их функциональных показателей: автореф. дис. ... докт. техн. наук.: 05.02.08 / Носов Николай Васильевич. - Самара, 1997. – 46 с. 12. Обеспечение формирования поверхностного слоя конструкционной керамики на основе имитационного моделирования процессов алмазного шлифования [Электронный ресурс] / А.С. Корниенко. – Автореферат магистерской диссертации. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2004/mech/korniyenko/diss/index.htm>, свободный. – Загл. с экрана. 13. Осипов А.П. К вопросу расчета сил при резании единичным абразивным зерном / А.П. Осипов // Вестник СамГТУ. Серия “Технические науки”. - 2004. – № 24. - С.144 -151. 14. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования / В.И. Островский. - Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1981. - 141 с.: ил. 15. Рыжов Э.В. Математические методы в технологических исследованиях / Э.В. Рыжов, О.А. Горленко. – Киев: Наукова думка, 1990. – 184 с. - ISBN 5-12-001622-7. 16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008612376. Исследователь абразивных зерен / Дрябов А.Н., Осипов А.П.; правообладатель ГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет». - № 2008611390; заявл. 02.04.2008; зарег. 16.05.2008. 17. Степанов Ю.С. Имитационное моделирование процесса внутреннего шлифования сборным комбинированным инструментом / Ю.С. Степанов, И.Ф. Щадрин, А.И. Поляков // Справочник. Инженерный журнал. – 2007. - №6. – С. 33-35. 18. Сулов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Сулов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с. 19. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979.- 248 с. 20. Hecker R.L. Predictive modeling of surface roughness in grinding / R.L. Hecker, S.Y. Liang // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2003. – 43. – P.755-761. 21. Zhou X. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process / X. Zhou, F. Xi // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2002. – 42. – P.969-977.

Надійшла до редколегії 05.07.2010