

А.В. ШИРОКОВ, инженер, Сф СамГТУ, Сызрань, Россия;

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

Р.Н. МАСУРОВ, инженер, Сф СамГТУ, Сызрань, Россия

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ШЛИФОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО МИКРОРЕЗАНИЮ ЕДИНИЧНЫМ АБРАЗИВНЫМ ЗЕРНОМ

У статті наведені результати експериментів по мікрорізанню пластин-зразків одиничним зерном. Отримані експериментальні дані про параметри рисок-царапин рівняються з теоретичними. Теоретичні параметри розраховуються по формулах, отриманим раніше в результаті математичного моделювання взаємодії абразивної ріжучої крайки з оброблюваним матеріалом. На підставі зіставлення теоретичних і експериментальних даних зроблені висновки про адекватність і точність розробленої математичної моделі.

В статье приведены результаты экспериментов по микрорезанию пластин-образцов единичным зерном. Полученные экспериментальные данные о параметрах рисок-царапин сравниваются с теоретическими. Теоретические параметры рассчитываются по формулам, полученным ранее в результате математического моделирования взаимодействия абразивной режущей кромки с обрабатываемым материалом. На основании сопоставления теоретических и экспериментальных данных сделаны выводы об адекватности и точности разработанной математической модели.

In this paper results of experiments on microcutting of plates-samples by individual grain are presented. The received experimental data about parameters of scratches are compared to the theoretical ones. Theoretical parameters pay off under the formulas received earlier as a result of mathematical modelling of interaction of an abrasive cutting edge with the processed material. On the basis of comparison theoretical and experimental data, conclusions are drawn on adequacy and accuracy of the developed mathematical model.

Основные обозначения и сокращения

АЗ – абразивное (или алмазное) зерно;

РВ – резцовая вставка;

РК – режущая кромка;

ШК – шлифовальный круг.

Введение

Тенденция к возрастанию уровня современной техники диктует повышенные требования к эксплуатационным характеристикам поверхности деталей. В большинстве случаев проблема может быть решена не за счет применения новых методов обработки, а посредством изучения и совершенствования уже существующих методов, одним из которых является шлифование.

На операциях шлифования зачастую происходит окончательное формирование шероховатости поверхности детали, которая влияет на ее эксплуатационные свойства. Анализ литературы [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 и др.] показал, что проблема управления процессом формирования шероховатости шлифованной поверхности к настоящему времени полностью не решена и остается актуальной.

Все имеющиеся математические модели процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности можно разделить на три группы.

1) Аналитические модели, представляющие собой эмпирические зависимости параметров шероховатости обработанной поверхности от различных характеристик процесса шлифования [0, 0]. В статистике такие модели получили название регрессионных. Они содержат большое количество эмпирических коэффициентов. Их значения получают в результате статистической обработки экспериментальных данных.

2) Аналитические модели, представляющие собой теоретические или преимущественно теоретические зависимости [0, 0, 0]. Их получают в результате анализа абстрактных систем, которыми заменяют реальные (физические) системы. Модели 2-й группы, как правило, имеют более широкую область применения, т.е. обладают большей универсальностью в сравнении с моделями 1-й группы. При их использовании отпадает необходимость в большом числе экспериментальных исследований.

3) Имитационные модели, представляющие собой компьютерные программы. Они шаг за шагом воспроизводят события, происходящие в реальной (физической) системе [0, 0, 0, 0, 0].

Из всех математических моделей процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности на наш взгляд предпочтительно применение теоретических моделей 2-й и 3-й группы. При этом имеющиеся модели зачастую сложны, не обеспечивают высокой точности прогнозирования параметров качества шлифованной поверхности. Многие из этих моделей содержат эмпирические коэффициенты, которые отражают влияние неучтенных факторов.

В основу созданной математической модели авторами статьи [0] положено следующее предположение: АЗ, внедрившееся на большую глубину, выдавит больший объем материала и образует канавку с большими 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:

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

где t_k – глубина канавки, $h_{H_{\max}}$ – высота (радиус) навалов.

Глубину канавки t_k в первом приближении 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. 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 рисок.

В результате проведенных исследований [0] было получено следующее уравнение для высоты навалов

$$h_{H_{\max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot S_{y_{\max}}}{\pi}}, \quad (2)$$

$$S_{y_{\max}} = \begin{cases} \int_{t_k+h_{\text{изн}}}^{t_k+h_{\text{изн}}} f(y) dy, & t_k + h_{\text{изн}} \leq y_{\min}; \\ \int_{h_{\text{изн}}}^{t_k+h_{\text{изн}}} f(y) dy - \int_{h_{\text{изн}}}^{t_k+h_{\text{изн}}} f(y - y_{\min}) dy, & h_{\text{изн}} \geq y_{\min}; \\ \int_{h_{\text{изн}}}^{t_k+h_{\text{изн}}} f(y) dy - \int_{y_{\min}}^{t_k+h_{\text{изн}}} f(y - y_{\min}) dy, & \begin{cases} h_{\text{изн}} < y_{\min}; \\ t_k + h_{\text{изн}} > y_{\min}. \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

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

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

v и b – параметры формы образующей РК, $h_{\text{изн}}$ – линейный износ РК, y_{\min} – минимальная глубина внедрения неизношенной РК ($h_{\text{изн}}=0$), при которой начнется процесс снятия стружки [0]:

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

β_1 – угол сдвига, определяющий направление скольжения слоев обрабатываемого материала в момент отрыва. Согласно исследованиям авторов статьи угол β_1 определяется по следующей формуле:

$$\beta_1 = \arctg \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{\delta}{\psi} + \nu \right)}, \quad (4)$$

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

Используя разработанную математическую модель образования единичной риски [0] можно получить формулы для других параметров единичной риски. Формула для определения ширины навалов b_n

$$b_n \approx 2 \cdot h_{H_{\max}}. \quad (5)$$

Формула для определения расстояния между вершинами навалов l_n

$$l_n = b_k + b_n, \\ l_n \approx b \cdot t_k^y + 2 \cdot h_{n\max}, \quad (6)$$

где b_k – ширина шлифовочной канавки.

Формула для определения коэффициента навалов ϵ_n

$$\epsilon_n = \frac{S_{y\max}}{t_k + h_{изн}} = \frac{S_{y\max}}{\frac{b}{v+1} \cdot \left[(t_k + h_{изн})^{v+1} - h_{изн}^{v+1} \right]}, \quad (7)$$

или как следует из формулы (3)

$$\epsilon_n = \begin{cases} 1, & t_k + h_{изн} \leq y_{\min}; \\ \frac{\int_{t_k + h_{изн}}^{y_{\min}} f(y - y_{\min}) dy}{\int_{h_{изн}}^{t_k + h_{изн}} f(y) dy}, & h_{изн} \geq y_{\min}; \\ 1 - \frac{y_{\min}}{t_k + h_{изн}} \frac{\int_{h_{изн}}^{t_k + h_{изн}} f(y - y_{\min}) dy}{\int_{h_{изн}}^{t_k + h_{изн}} f(y) dy}, & \begin{cases} h_{изн} < y_{\min}; \\ t_k + h_{изн} > y_{\min}. \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

Как следует из этой формулы, коэффициент навалов не может быть больше 1, что логично.

Формула для определения относительной высоты навалов $\epsilon_{вн}$

$$\epsilon_{вн} = \frac{h}{t_k} \cdot \frac{h_{\max}}{h_{изн}}. \quad (9)$$

Цель работы. Проверить адекватность разработанной теоретической модели взаимодействия единичных абразивных зерен с обрабатываемым материалом при микрорезании пластин-образцов единичной РК.

Задачи. 1) Разработать план проведения экспериментов для определения точности созданной математической модели образования единичной шлифовочной риски. 2) Провести эксперименты в соответствии с разработанным планом. 3) Сопоставить результаты экспериментов с

результатами теоретических расчетов. 4) Сделать выводы по проделанной работе. 5) Определить пути дальнейшего совершенствования созданной математической модели.

Экспериментальная установка, воспроизводящая схему плоского шлифования периферией круга, была собрана на базе универсально-заточного станка модели ЗЕ642Е (рис. 1). На шпиндель станка устанавливался алюминиевый диск. На периферии диска с помощью винта закреплялась резцовая вставка с режущей частью из КНБ (эльбора).

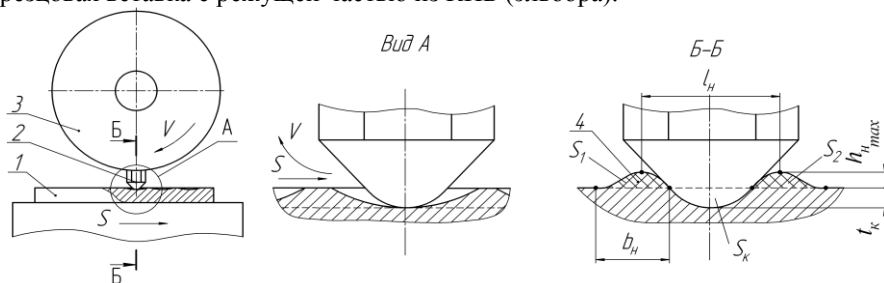


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки по микрорезанию единичным абразивным зерном

Для проведения экспериментов было изготовлено 6 резцовых вставок. Их заточка осуществлялась алмазными кругами на универсально-заточном станке модели ЗЕ642Е. Далее с помощью металлографического цифрового комплекса Альтами МЕТ 1 были получены фотографии режущей части вставок (рис. 2).

Их контуры с помощью специальной программы [0, 0, 0] по методу наименьших квадратов аппроксимировали параболой, причем правый и левый контур описывали отдельно. Соответствующие параметры аппроксимации режущей части вставок приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры резцовых вставок [0]

Номер РВ	$b_{л}$	$b_{пр}$	$v_{л}$	$v_{пр}$
1	6,302	2,533	0,576	0,859
2	4,127	4,14	0,715	0,822
3	3,958	4,23	0,809	0,74
4	2,606	2,184	0,909	1,002
5	8,254	8,972	0,633	0,69
6	2,936	3,129	0,905	0,909

Примечания. 1. $v_{л}$, $b_{л}$ – параметры аппроксимации *левого* контура режущей части РВ параболой.
2. $v_{пр}$, $b_{пр}$ – параметры аппроксимации *правого* контура режущей части РВ параболой.

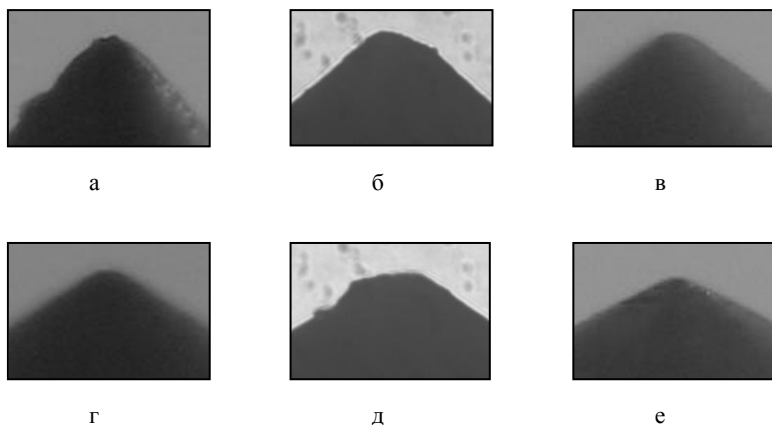


Рисунок 2 – Фотографии вершин режцовых вставок ($\times 225$)
 а – РВ №1; б – РВ №2; в – РВ №3; г – РВ №4; д – РВ №5; е – РВ №6

Пластины-образцы для микрорезания были изготовлены из стали 45 (HB 170...180). Перед экспериментом пластины подвергались шлифованию и последующей доводке до шероховатости $R_a=0,32$ мкм ($R_z=4,0$ мкм, $R_{max}=6,3$ мкм) с целью минимизировать ее влияние на форму рисок.

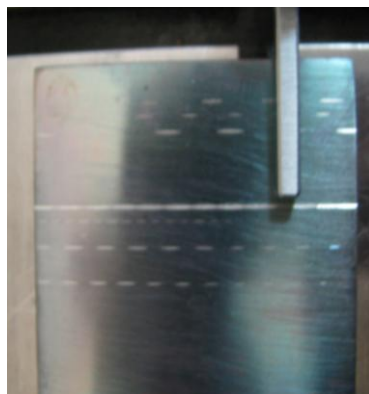
Режимы микрорезания пластин-образцов (глубина, продольная подача стола станка и скорость) устанавливались такими, что риска, полученная за один оборот диска (за одно внедрение вставки) не перекрывала предыдущую.

В реальном процессе шлифования каждое зерно внедряется в металл, нагретый до высокой температуры действием ранее работавших зерен [0, 0]. Такой нагрев влияет на свойства ПС детали и условия упруго-пластического деформирования и стружкообразования [0]. С целью приблизить условия эксперимента к условиям реального процесса шлифования пластины-образцы непосредственно перед микрорезанием нагревались с помощью ТВЧ до температуры порядка 500-600°C.

Полученные риски (царапины) исследовали с помощью профилографа модели 170623 (рис. 3). На стойке профилографа устанавливался предметный крестовый стол. Минимальный регулируемый шаг перемещения стола в поперечном и продольном направлении составляет 0,01 мм. Это позволило получить ряд поперечных сечений риски (царапины) и проследить изменение ее параметров по мере внедрения режцовой вставки в обрабатываемый материал. Для заданной режущей вставки и скорости микрорезания анализу подвергались не менее 30 профилограмм. Пример участка профилограммы, содержащего риску, приведен на рис. 4.



а



б

Рисунок 3 – Экспериментальная установка для профилографирования пластин-образцов: а – общий вид; б – процесс работы (профилографирования)

В каждом сечении определялись следующие параметры (рис. 4): 1)

глубина риски (царапины) t_k ; 2) высота навалов $h_{H_{\max}} = \frac{h_{H_{\text{л}}} + h_{H_{\text{пр}}}}{2}$ ($h_{H_{\text{л}}}$ и $h_{H_{\text{пр}}}$ – высота левого и правого навалов соответственно); 3) ширина навалов

$b_{H_{\text{л}}} = \frac{b_{H_{\text{л}}} + b_{H_{\text{пр}}}}{2}$ ($b_{H_{\text{л}}}$ и $b_{H_{\text{пр}}}$ – ширина левого и правого навалов соответственно);

3) расстояние между вершинами навалов l_n ; 4) коэффициент навалов

$\epsilon_n = \frac{S_{\text{л}} + S_{\text{пр}}}{S_k}$ ($S_{\text{л}}$ и $S_{\text{пр}}$ – площадь поперечного сечения левого и правого навалов соответственно, S_k – площадь шлифовочной канавки); 5)

относительная высота навалов $\epsilon_{\text{вн}} = \frac{h_{H_{\max}}}{t_k}$.

Результаты измерения вышеперечисленных параметров показаны на рис. 5-9. Согласно формуле (4) угол сдвига β_1 для условий экспериментов находится в интервале 22-29°. Согласно С.Н. Корчаку [0] для стали 45 угол сдвига $\beta_1=22^\circ$. Графики (сплошная и штриховая линии) на рис. 5 отражают полученные ранее теоретические зависимости (2), (5)-(9).

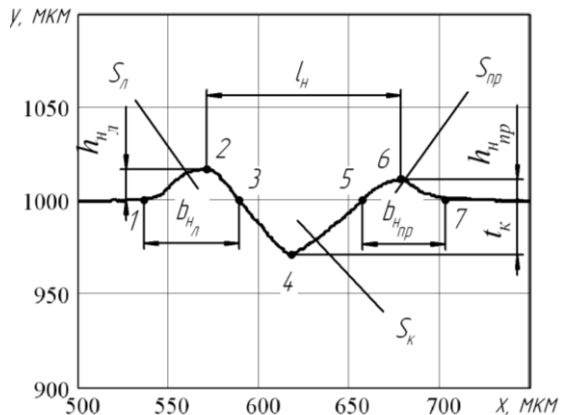


Рисунок 4 – Измеряемые параметры риски (царапины)

Из рис. 5 и 6 видно, что имеет место удовлетворительное совпадение результатов расчетов параметров $h_{n_{\max}}$ и L_n с результатами измерений (экспериментов), несмотря на то, что реальная форма навалов отличается от принятой. Данные результаты позволяют констатировать тот факт, что часть навалов имеет форму кругового сегмента.

По этой же причине, расчет по формуле (5) дает заниженные значения ширины навалов b_n в сравнении с результатами измерений (рис. 7), однако форма теоретической и экспериментальной зависимости подобны. Можно предположить, что на точность экспериментального определения ширины навалов влияет субъективный фактор – положение точек 1 и 7 (рис. 4) выбирает сам исследователь.

Поля рассеяния экспериментальных точек на рис. 8 и говорят об отсутствии явных зависимостей коэффициента навалов ϵ_n и относительной высоты навалов $\epsilon_{вн}$ от глубины микрорезания t_k . На наш взгляд, на параметры ϵ_n и $\epsilon_{вн}$ сильно влияют случайные факторы, в том числе изменение структуры металла навалов, которое не учитывается теоретической моделью. В связи с этим точность определения параметров ϵ_n и $\epsilon_{вн}$ с помощью формул (8) и (9) невысока. Обращает на себя внимание тот факт, что зачастую коэффициент навалов $\epsilon_n > 1$, особенно при глубине канавки $t_k < 10$ мкм.

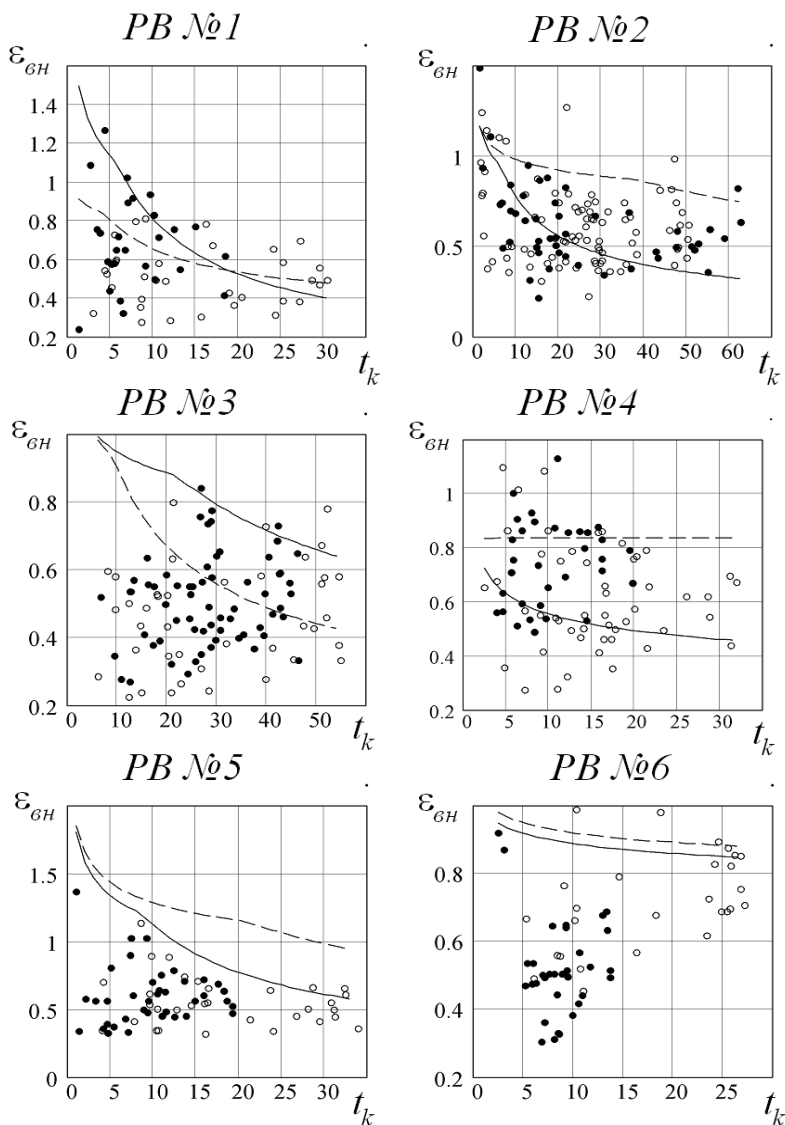


Рисунок 4 – Зависимость относительной высоты навалов $\epsilon_{вн}$ от глубины внедрения единичного зерна t_k
 ○ - скорость микрорезания 18 м/с; ● - скорость микрорезания 35 м/с; сплошная линия соответствует параметрам v и b правой РК ПВ; штриховая линия соответствует параметрам v и b левой РК ПВ.

Это объясняется, на наш взгляд, влиянием исходной шероховатости пластин образцов. Большое значение коэффициента навалов можно объяснить также положением точек 1 и 7: удаление точек от риски-царапины увеличивает площадь навалов и, как следствие, значения параметра ε_n . В ходе обсуждения

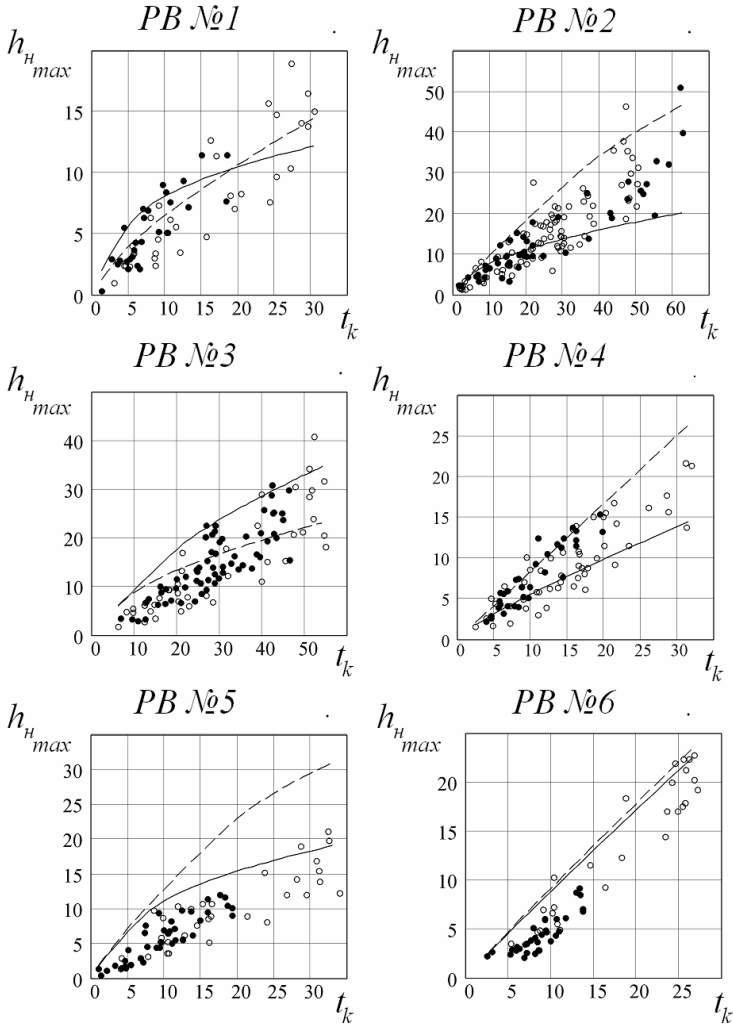


Рисунок 5 – Зависимость высоты навалов $h_{i\max}$ от глубины внедрения единичного

зерна t_k : \circ - скорость микрорезания 18 м/с; \bullet - скорость микрорезания 35 м/с; сплошная линия соответствует параметрам v_{np} , b_{np} РК ПВ; штриховая линия соответствует параметрам v_n , b_n РК ПВ.

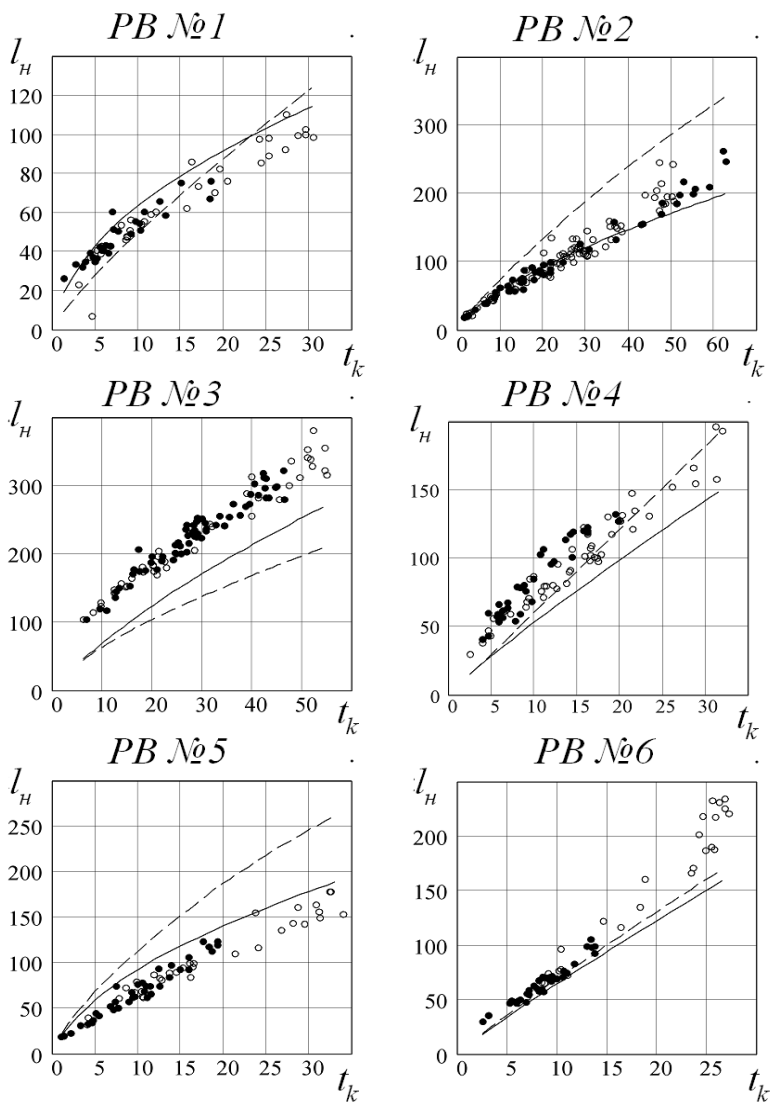


Рисунок 6 – Зависимость расстояния между вершинами навалов l_H от глубины внедрения единичного зерна t_k
 ○ - скорость микрорезания 18 м/с; ● - скорость микрорезания 35 м/с; сплошная линия соответствует параметрам $v_{пр}$, $b_{пр}$ РК ПВ; штриховая линия соответствует параметрам v_d , b_d РК ПВ.

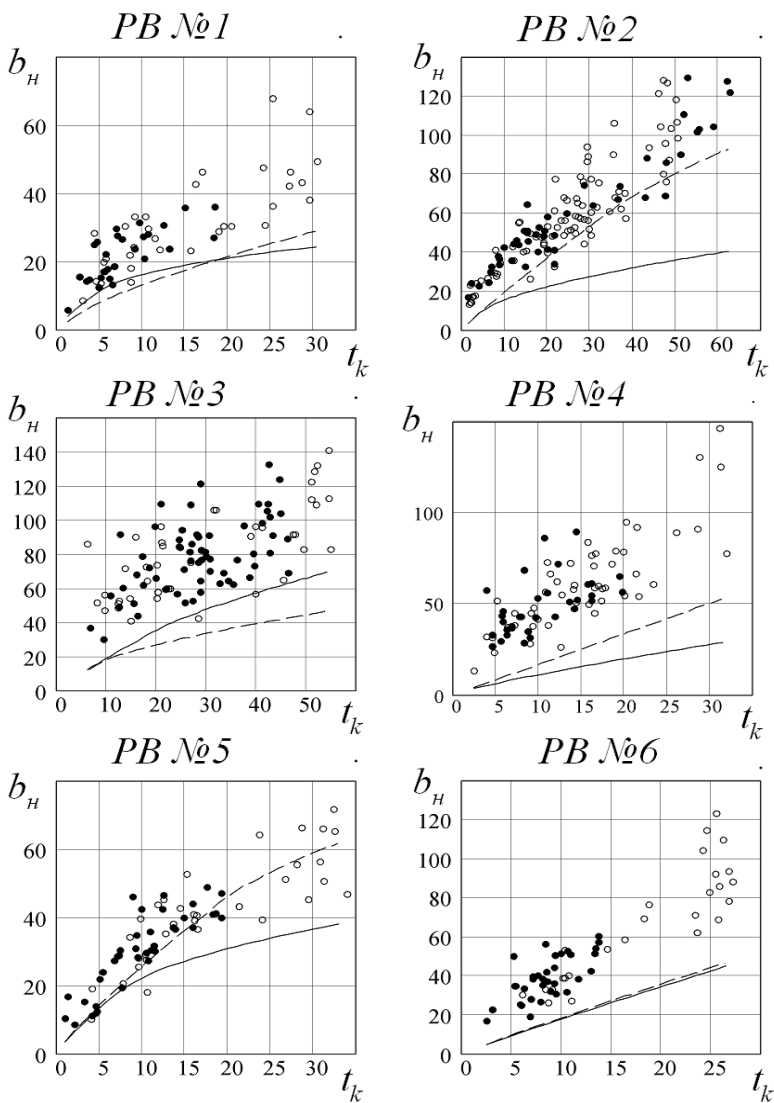


Рисунок 7 – Зависимость ширины навалов b_H от глубины внедрения единичного зерна t_k

○ - скорость микрорезания 18 м/с; ● - скорость микрорезания 35 м/с; сплошная линия соответствует параметрам v_{np} и b_{np} РК ПВ; штриховая линия соответствует параметрам v_n и b_n РК ПВ.

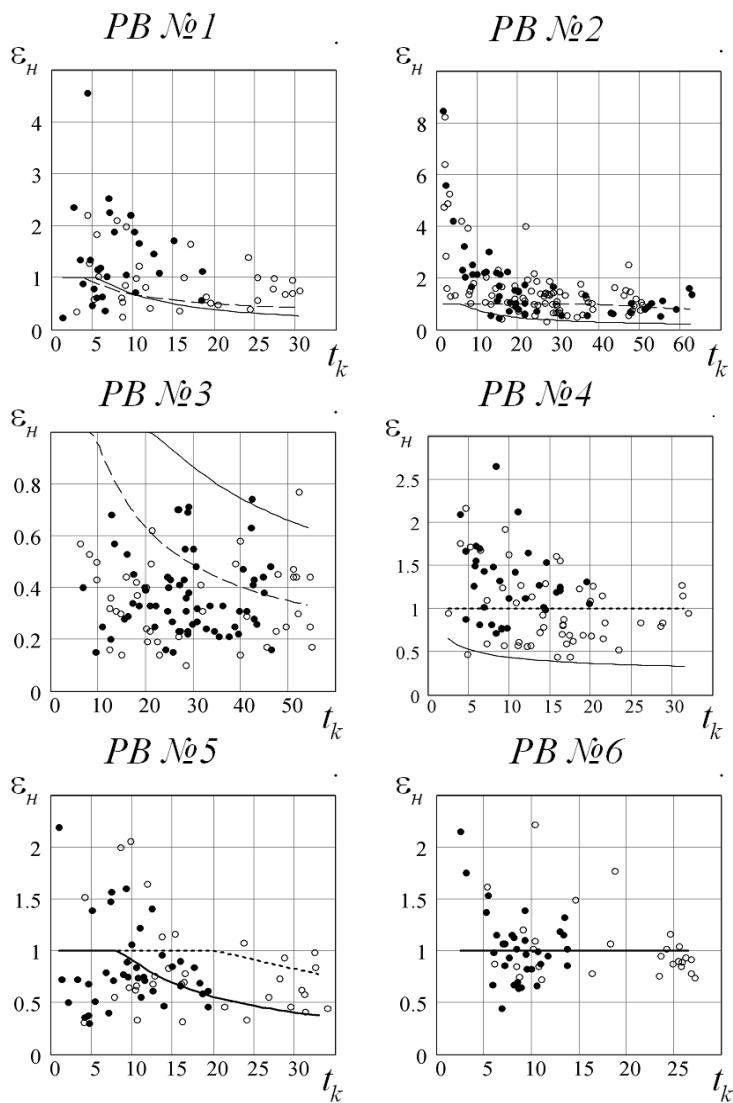


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента навалов ε_H от глубины внедрения единичного зерна t_k

○ - скорость микрорезания 18 м/с; ● - скорость микрорезания 35 м/с; сплошная линия соответствует параметрам v_{np} и b_{np} РК ПВ; штриховая линия соответствует параметрам v_d и b_d РК ПВ.

результатов эксперимента было установлено, что на поперечный профиль риски-царапины особенно при малых глубинах внедрения сильно влияет профиль вершины алмазной иглы профилометра, что сказывается и на положении крайних точек 1 и 7.

Необходимо отметить, что для всех экспериментальных зависимостей изменение скорости шлифования не меняет их вид.

В результате проделанной работы можно сделать следующие **выводы**.

1. Разработан математический аппарат, позволяющий предсказывать высотные и шаговые параметры единичной шлифовочной риски-царапины.

2. Близость теоретических и экспериментальных значений высоты навалов $h_{n\max}$ и расстояния между вершинами навалов l_n от глубины микрорезания t_k доказывает, что форма навалов соответствует полукругу у края риски. В данной области сосредоточена половина материала. Вместе с тем, профилограммы поперечного сечения рисков показывают, что форма всего навала отличается от полукруглой. Это вызвано смещением материала под давлением вытесняемого металла.

3. Теоретические значения ширины навалов b_n в большинстве случаев меньше экспериментальных. Это связано с соответствием формы навалов полукругу только у края риски; с удалением от него материал распределяется по более плавной кривой за счет указанного выше смещения материала.

4. Для большинства опытов средние теоретические значения коэффициента навалов ϵ_n и относительной высоты навалов $\epsilon_{вн}$ от глубины микрорезания t_k соответствуют середине поля рассеивания экспериментальных результатов. Большой разброс значений, на наш взгляд, обусловлен влиянием исходной шероховатости пластин-образцов и завышенным значением ширины навалов b_n (а, следовательно, и площади навалов) особенно при малых глубинах внедрения режущей кромки. Исходной шероховатостью можно объяснить и заниженные значения коэффициентов ϵ_n и $\epsilon_{вн}$, так как часть выдавленного материала могла перераспределяться во впадины исходного профиля.

5. Ввиду установленных зависимостей необходимо скорректировать методику подготовки образцов и методику обработки результатов эксперимента с тем, чтобы удалить влияние исходной шероховатости образцов и эффекта перераспределения материала в стороны от риски-царапины. Например, можно предложить полирование поверхности образцов, микрорезание с большей глубиной внедрения, правильный выбор направления микрорезания и т.п.

6. Изменение скорости микрорезания V в диапазоне 18-35 м/с не изменяет вида зависимостей для всех измеренных параметров, то есть условия микрорезания в этом диапазоне скоростей стабильны.

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. 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. 3. Зубарев Ю.М. Моделирование процесса плоского шлифования однослойными эльборowymi кругами / Ю.М. Зубарев, И.Д. Теннисон // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сб. статей междунар. науч.-технич. конф. «Шлифаабразив-2001» / Волжский инж.-строит. институт, филиал ВолГАСА – Волжский, 2001. – С. 284-286. 4. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. - М.: Машиностроение, 1974 – 280 с. 5. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. - М.: Машиностроение, 1974.- 320 с. 6. Маслова А.Ю. О методике определения геометрических параметров абразивной режущей кромок / А.Ю. Маслова, А.П. Осипов, В.В. Федотов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сб. статей междунар. науч.-технич. конф. «Шлифаабразив-2006» / Волжский институт строительства и технологий, филиал ВолГАСУ – Волжский, 2006. – С.74-77. 7. Никифоров И.П. Стохастическая модель процесса шлифования / И.П. Никифоров // Известия вузов. Машиностроение. – 2003. - №6. – С. 64-72. 8. 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. «Шлифаабразив-2004» / Волжский институт строительства и технологий, филиал ВолГАСУ – Волжский, 2004. – С.51-54. 9. 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. 10. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования / В.И. Островский. - Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1981. - 141 с.: ил. 11. 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. 12. 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. 13. 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. 14. Широков А.В. К вопросу о прогнозировании и обеспечении параметров шероховатости шлифованной поверхности / А.В. Широков, А.П. Осипов // Известия вузов. Машиностроение. – 2007. - №6. – С. 76-88. 15. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979.- 248 с. 16. 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. 17. 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