

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-24-35



УДК 621.9.06

2.5.6 – технология машиностроения

**УСТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИУСОВ
РЕЖУЩИХ ВЕРШИН
МАГНИТНО-АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН**

Леонов Сергей Леонидович

д.т.н., профессор кафедры
«Технология машиностроения»
Алтайского государственного технического
университета им. И.И. Ползунова,
Барнаул, РФ

Иконников Алексей Михайлович

к.т.н., доцент кафедры
«Технология машиностроения»
Алтайского государственного технического
университета им. И.И. Ползунова,
Барнаул, РФ

✉¹**Соломин Дмитрий Евгеньевич**

аспирант кафедры «Технология
машиностроения» Алтайского
государственного технического
университета им. И.И. Ползунова,
Барнаул, РФ
e-mail: d147s@mail.ru

Аннотация.

Статья посвящена распределению радиусов режущих вершин магнито-абразивных зерен при магнитно-абразивной обработке и сравнению полигонов распределения. Изложены проведенные экспериментальные исследования. Приведены графики распределения радиусов режущих вершин.

Ключевые слова: МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА, РАДИУСЫ РЕЖУЩИХ ВЕРШИН, ПОЛИГОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ, ПРОФИЛОГРАФ-ПРОФИЛОМЕТР, ОПТИЧЕСКИЙ ПРОФИЛОМЕТР-ИНТЕРФЕРОМЕТР.

¹ Автор для ведения переписки

**SETTING THE PARAMETERS OF THE
DISTRIBUTION OF THE RADIUS OF THE
CUTTING TOP OF MAGNETIC
ABRASIVE GRAINS**

Leonov Sergey Leonidovich

doctor of tech. sc. (engineering), associate
professor of the department of mechanical
engineering technologies of the Altai state
technical University. I.I. Polzunova,
Barnaul, RF

Ikonnikov Alexey Mikhailovich

cand. of tech.sc. (engineering),
associate professor engineering
technologies of the Altai state
technical University. I. I. Polzunova,
Barnaul, RF

✉¹**Solomin Dmitry Evgenevich**

postgraduate student of the
Department of Mechanical
Engineering Technologies of the
Altai state technical University.
I. I. Polzunova, Barnaul, RF
e-mail: d147s@mail.ru

Annotation.

The article is devoted to the distribution of the radii of the cutting tips during magnetic-abrasive processing and comparison of distribution polygons. The conducted experimental researches are stated. Graphs of the distribution of the radii of the cutting vertices are given.

Keywords: MAGNETIC ABRASIVE MACHINING, CUTTING TOP RADIUS, DISTRIBUTION POLYGONS, PROFILOGRAPH-PROFILOMETER, OPTICAL PROFILOMETER-INTERFEROMETER.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В настоящее время в машиностроительных изделиях удельный вес деталей, изготовленных из композиционных, пластиковых, пластмассовых, резиновых материалов постоянно увеличивается. Такие изделия эффективно формируются на термопласт-автоматах. Основным видом технологической оснастки термопласт-автомата является пресс-форма. Пресс-формы

преимущественно изготавливают из алюминиевых сплавов. Качество поверхностей изделий определяется шероховатостью формообразующей поверхности пресс-формы. Шероховатость поверхности обеспечивают фрезерованием концевой фрезой и последующим ручным полированием. Ручное полирование не обеспечивает стабильные показатели качества поверхности, требует высокой квалификации рабочего и имеет низкую производительность.

Автоматизация финишных операций является актуальной технологической проблемой. Выполнение финишных операций на станках с ЧПУ позволяет обеспечивать стабильное качество обрабатываемых поверхностей, повышает производительность и снижает себестоимость готового изделия. Одним из наиболее эффективных способов финишной обработки сложно-профильных поверхностей является процесс магнитно-абразивной обработки. Магнитное поле, действующее на зерна, удерживает их в рабочем зазоре, тем самым обеспечивая их эластичную связку, позволяя копировать контур обрабатываемого изделия.

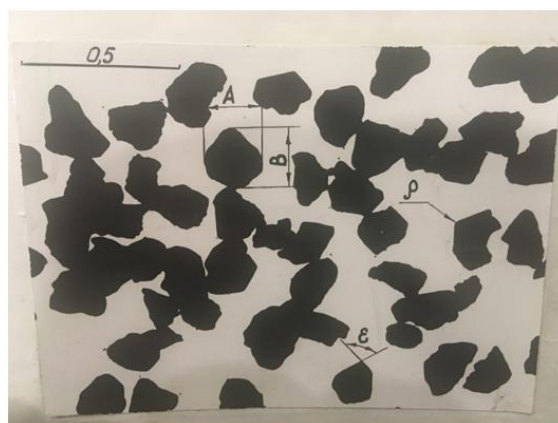
Съем металла и формирование шероховатости при магнитно-абразивной обработке (МАО) определяется массовым взаимодействием абразивных зерен с материалом заготовки. Зерна имеют случайные геометрические характеристики, случайно расположены на поверхности инструмента и внедряются в обрабатываемый материал на глубину, также имеющую случайные составляющие. Зерно воздействует на поверхность заготовки лишь несколькими гранями, поэтому для расчета шероховатости после магнитно-абразивной обработки требуется знать геометрические параметры данных вершин.

2 Материалы и методы

В работе применялись теоретические исследования на базе научных основ технологии машиностроения, теории резания, системного анализа, сопротивления материалов, теории пластичности и упругости. Подтверждение теоретических положений обеспечивалось экспериментальными методами лабораторных исследований с обработкой экспериментальных данных. Применялись физические методы анализа качества микрорельефа. Результаты экспериментов обрабатывались с помощью методов математической статистики.

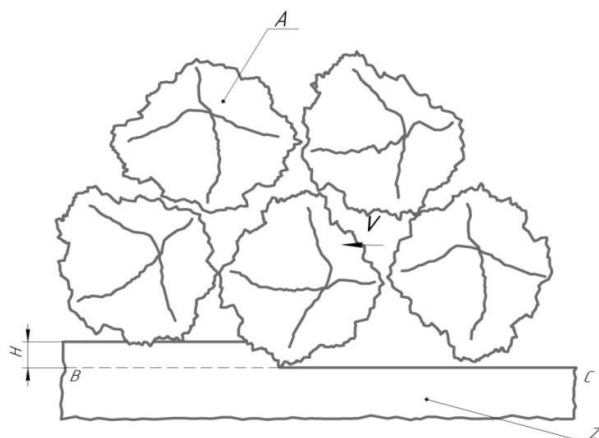
3 Результаты исследований

Для математического моделирования глубины резания магнитно-абразивного зерна необходимо знать размер его внедряемого элемента. Магнитно-абразивное зерно имеет сложную форму (рис. 1) с различными режущими кромками. При прохождении в рабочем зазоре зерно контактирует несколькими гранями, тем самым оно погружается в материал не полностью, а на часть глубины данных режущих кромок (рис. 2). Каждая режущая кромка имеет свой радиус округления (чуть больше написать почему не острая грань, а радиус скругления), для определения данных радиусов нами был проведен эксперимент.



A, B – размеры зерна, ρ – радиус округления вершины зерна, ε – угол при вершине зерна

Рисунок 1 – Магнитно-абразивные зерна



A – абразивное зерно; *BC* – линия среза; *H* – глубина резания; *V* – скорость резания; *Z* – заготовка

Рисунок 2 – Стохастический характер магнитно-абразивной обработки

При измерении радиусов возможно использование любого материала, обеспечивающего копирование профиля вершин. Было принято решение заменить дюралюминий на органическое стекло, т.к. магнитная проницаемость материалов практически одинаковая и на стекле остаются достаточно глубокие риски, после магнитно-абразивной обработки.

Для получения профилей режущих вершин анализировали профили царапин, нанесенных зернами инструмента на поверхности полированного органического стекла. Для этого пластина органического стекла прижималась к индуктору с зернами с усилием 1000 Н. Затем производилось перемещение пластины относительно неподвижного инструмента. На рисунке 3 приведена фотография установки для получения рисок, а на рисунке 4 – фотография образцов с рисками.

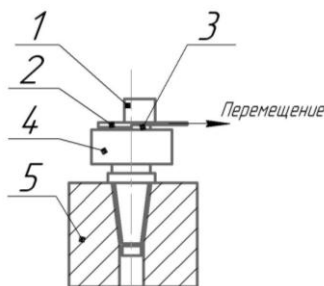
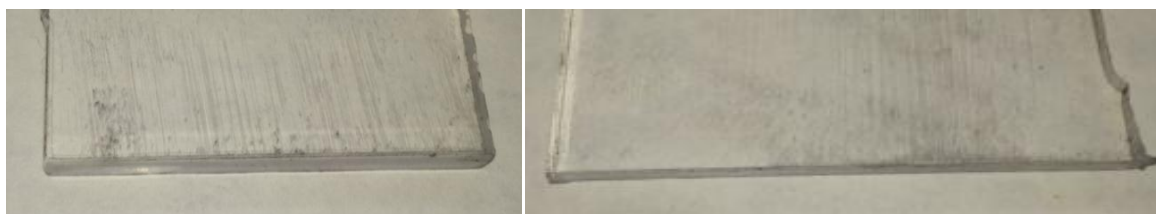


Рисунок 3 – Установка для получения профилей рисок



a – использование неизношенного магнитно-абразивного порошка;
б – использование магнитно-абразивного порошка после 30 минут работы

Рисунок 4 – Образцы с рисками

Магнитный индуктор 4 помещается в стойку-держатель 5 и на его торцевую часть наносится магнитно-абразивный порошок. Планка 2 имеет выступ, в который устанавливается немагнитный образец 3 из органического стекла. Планка с прикрепленным образцом устанавливаются на торцевую часть индуктора и прижимаются немагнитным грузом 1 массой 5

кг. После этого плита 2 перемещается для получения рисок.

В эксперименте использован магнитно-абразивный порошок зернистостью 630 / 40 до обработки и после обработки стальных деталей в течении 30 мин. При помощи микроскопа ММИ-2 (рис. 5) после экспериментальных исследований на образцах были получены фотографии рисок (рис. 6).

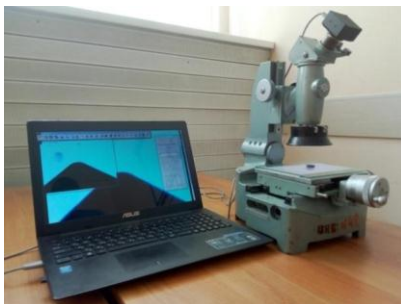


Рисунок 5 – Микроскоп ММИ-2

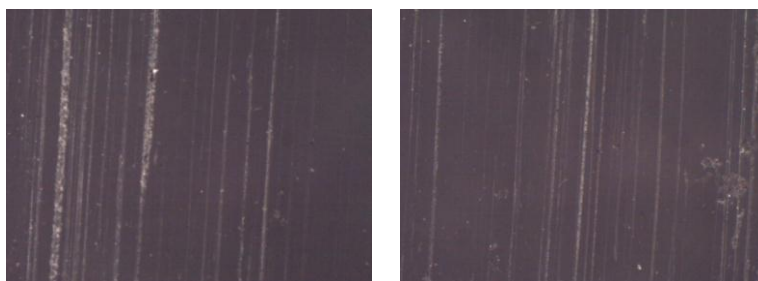


Рисунок 6 – Фотографии рисок под микроскопом

Полученные на установке риски анализировались на профилографе-профилометре HOMMEL TESTER W55 (рис. 7) и оптическом профилометре Veeco NT9080 (рис. 8). Оптический профилометр объединяет в себе интерферометр и микроскоп.



Рисунок 7 – Профилограф-профилометр HOMMEL TESTER W55

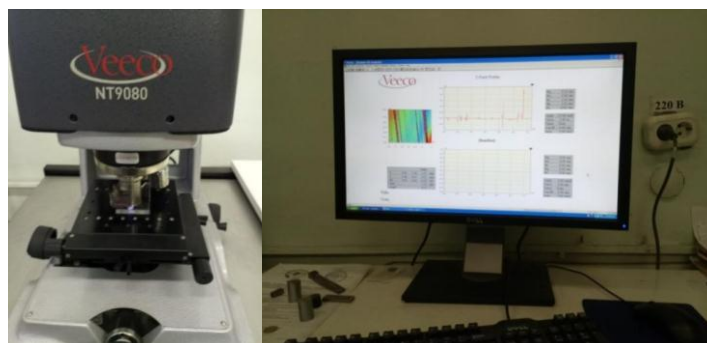


Рисунок 8 – Оптический профилометр-интерферометр Veeco NT9080

На рисунке 9 показан пример сформированной топографии. Из этого рисунка видно, что по краям полученных рисок имеются заусенцы. Поэтому для анализа радиусов вершин зерен необходимо брать только внутреннюю часть рисок, исключая их края.

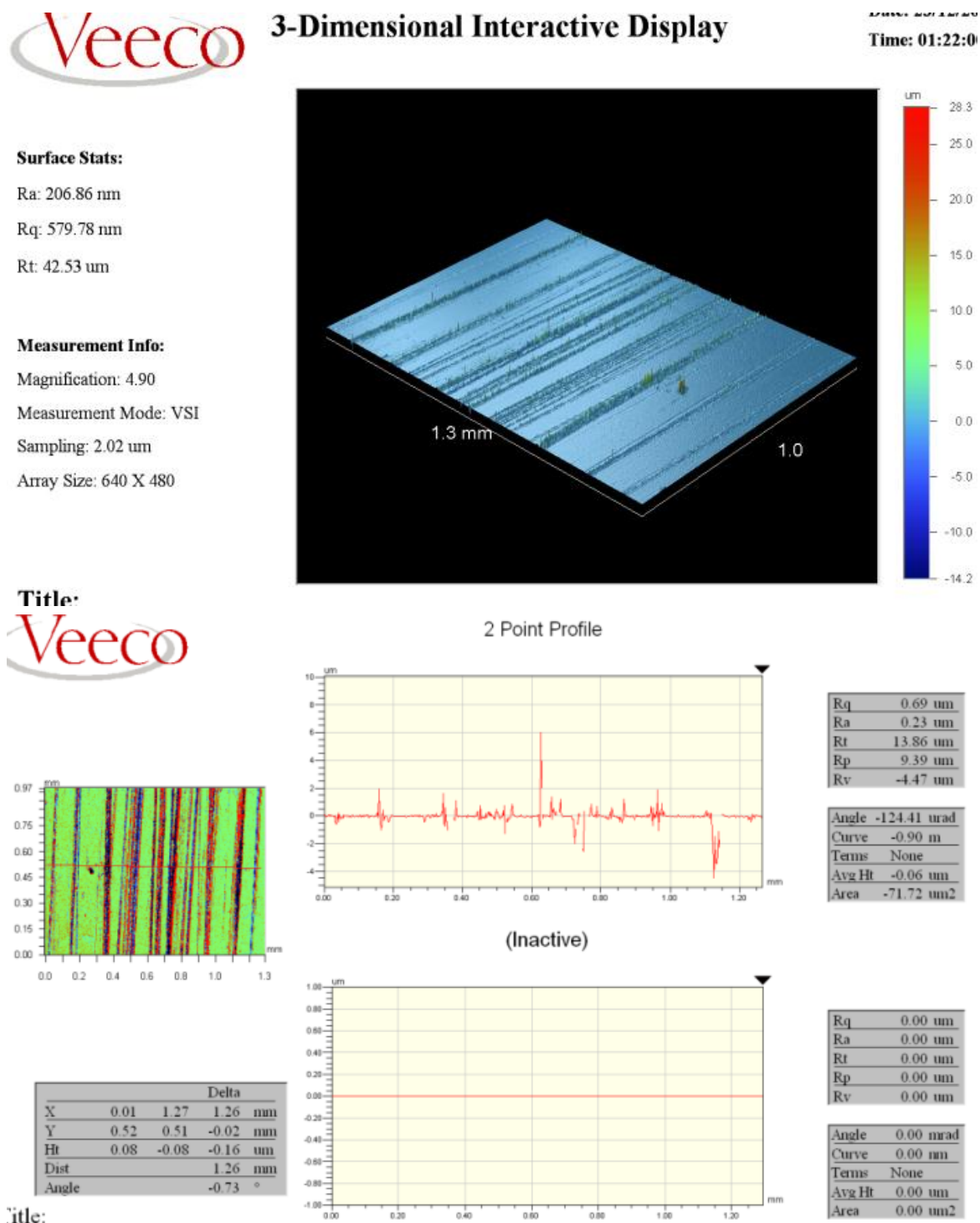


Рисунок 9 – Топография поверхности с рисками

На рисунке 10 показан фрагмент профилограммы поверхности с рисками. Для анализа выбирались наиболее глубокие риски, чтобы исключить влияние связывающей части магнитно-абразивных зерен. На профилограммах явно видны профили заусенцев, которые при анализе профилей рисок исключались из рассмотрения.

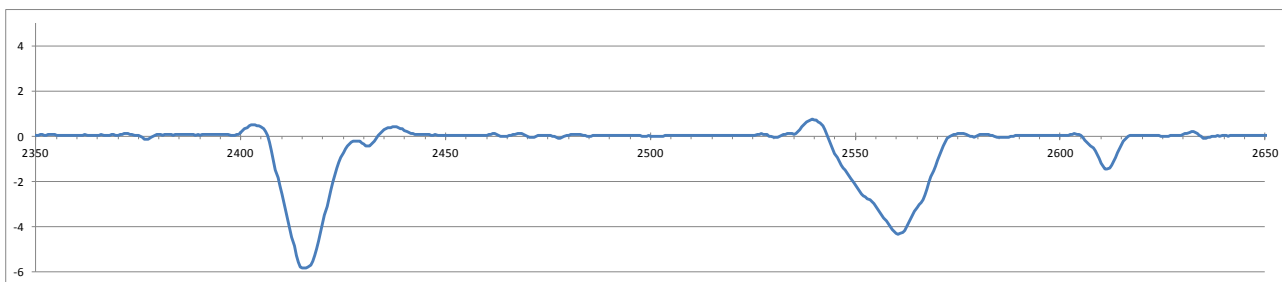


Рисунок 10 – Фрагмент профилограммы с рисками

Обработка профилограмм производилась в табличном процессоре Excel с использованием макросов на VBA. На первом этапе сравнивались два вида аппроксимации профилей вершин: с помощью параболы и с помощью дуги окружности.

Радиусы режущих вершин определяют аппроксимируя их либо параболическим профилем, либо окружностью. На рисунке 11 показано представление режущей вершины параболой. При этом аналитически параболу можно описать выражением

$$y = a \cdot (x - x_1) \cdot (x - x_2), \quad (1)$$

где: x_1 и x_2 – координаты пересечения с осью абсцисс; a – параметр масштаба.

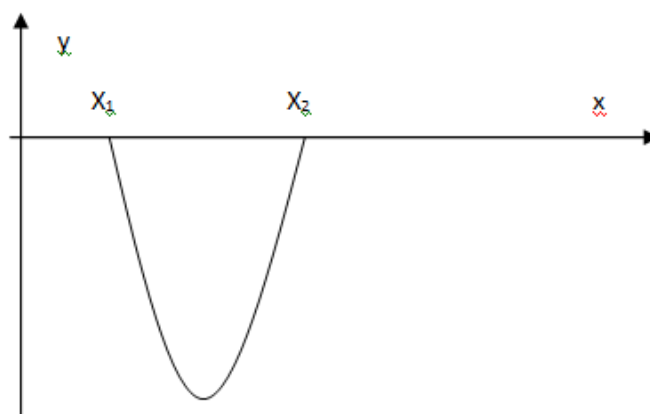


Рисунок 11 – Моделирование профиля режущей вершины параболой

Радиус при вершине параболы (радиус кривизны) определяется формулой:

$$\rho = 1/(2 \cdot a). \quad (2)$$

В соответствии с методом наименьших квадратов (МНК)

$$a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{(x_i - X_1) \cdot (x_i - X_2)}. \quad (3)$$

При аппроксимации профиля режущей части зерна дугой окружности ее математическое описание имеет вид:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2, \quad (4)$$

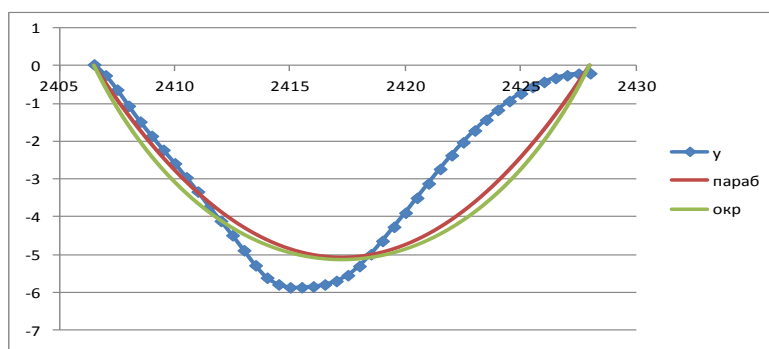
где x_0, y_0, R – координаты центра и радиус.

При прохождении окружности через точки X_1 и X_2 координаты ее центра определяются выражениями:

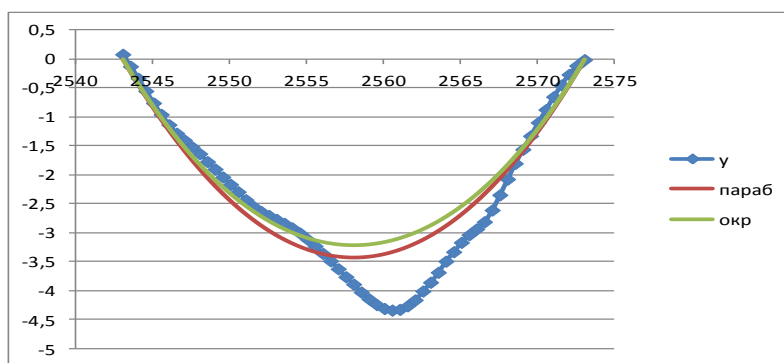
$$x_0 = \frac{X_1 + X_2}{2}; \quad y_0 = \sqrt{R^2 - \left(\frac{X_1 - X_2}{2}\right)^2}. \quad (5)$$

Для нахождения радиуса R можно использовать численный вариант метода наименьших квадратов – минимизирование суммы квадратов отклонений.

На рисунке 12 приведены примеры результатов аппроксимации двух рисок, а в таблице 1 – значения полученных радиусов для 4-х произвольно выбранных рисок. Сравнение значений радиусов округления при вершине параболы ρ и радиусов дуг окружности позволяет сделать вывод, что эти величины достаточно близки (погрешность аппроксимации значительно превышает погрешность расчета радиуса). Поэтому в дальнейшем рассчитывались только радиусы ρ .



а



б

Рисунок 12 – Примеры аппроксимации рисок параболой (а), дугами окружности (б)

Таблица 1 – Сравнение результатов аппроксимации

Номер риска	ρ , мкм	R , мкм
1	11,41	13,81
2	32,76	36,61
3	15,66	17,38
4	16,20	20,88

Экспериментальные исследования. Алгоритм расчета радиусов рисок, соответствующих радиусам режущих вершин, включает три шага:

1 Расчет средней линии профиля, убирающей погрешности базирования образца. При

этом профиль риски образовывался отрицательными значениями ординат.

2 Выделение отдельных рисков, исключая заусенцы и навалы по краям риски.

3 Аппроксимация профиля риски параболой и расчет радиуса округления ее вершины.

Алгоритм реализован на языке VBA в табличном процессоре Excel. В соответствии с ним для профилографа-профилометра HOMMEL TESTER W55 получены радиусы 384 зерен свежей порции порошка и 149 зерен после его износа. Для оптического профилометра Veeco NT9080 были получены радиусы 568 зерен до обработки и 843 зерен после 30 минут работы. По полученным значениям построены полигоны распределения значений радиусов и в соответствии с критерием χ^2 доказаны принадлежности соответствующих выборок экспоненциальному закону:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}. \quad (6)$$

На рисунках 13 и 14 показано сравнение полигонов плотности распределения с графиками для экспоненциального распределения, а на рисунке 15 – сравнение полигонов распределения.

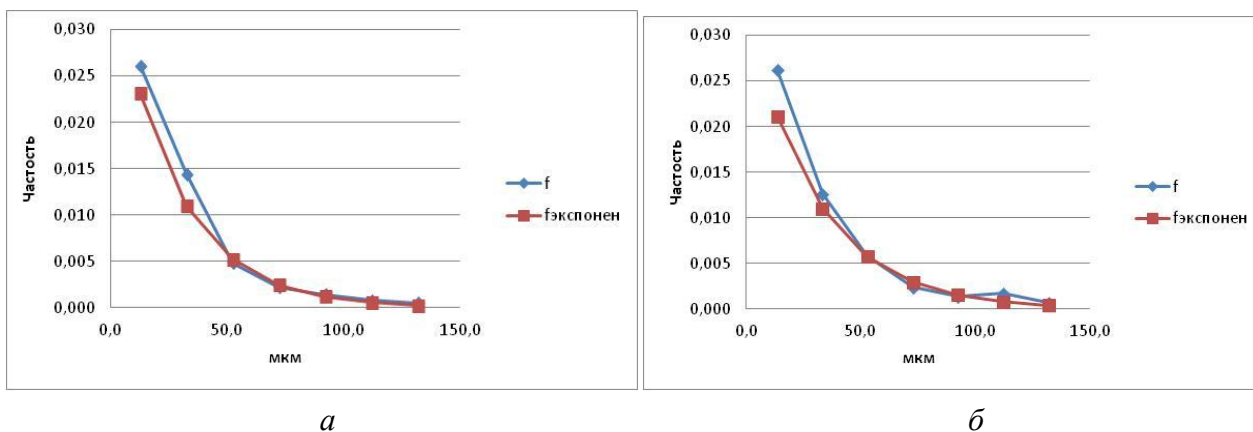


Рисунок 13 – Полигоны распределения режущих вершин, полученные после обработки результатов с профилографа-профилометра HOMMEL TESTER W55: до обработки (а) и после 30 мин работы (б)

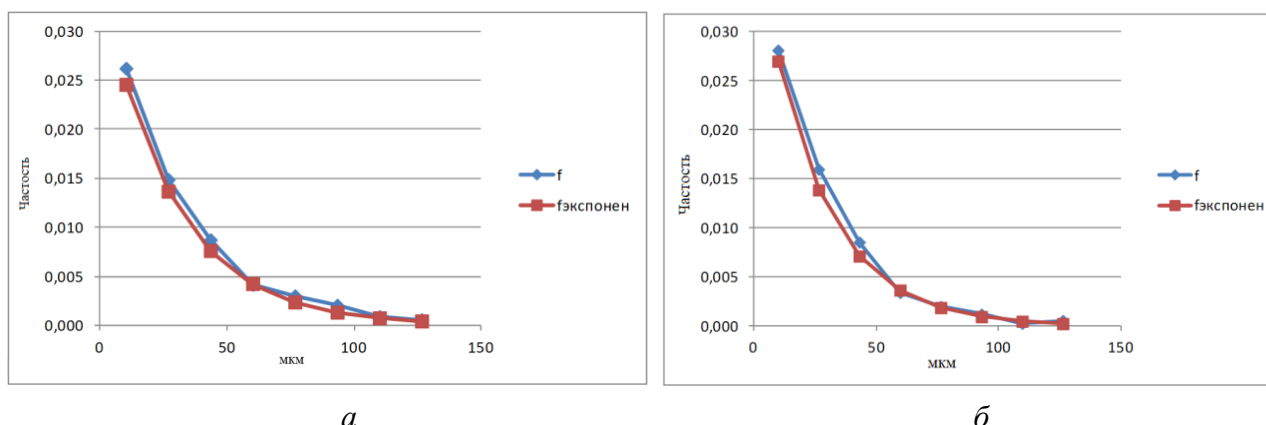


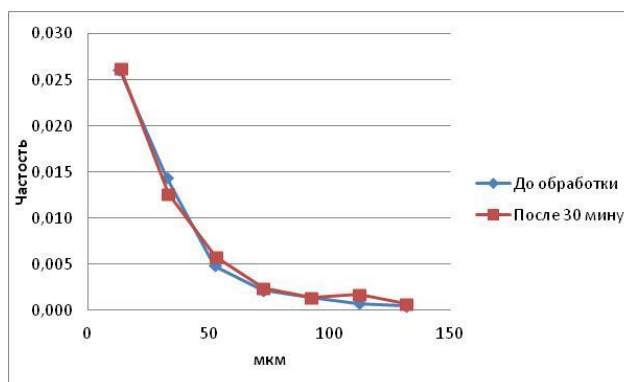
Рисунок 14 – Полигоны распределения режущих вершин, полученные после обработки результатов с оптического профилометра Veeco NT9080 до обработки (а) и после 30 мин работы (б)

Проведя анализ полученных полигонов распределения вершин до и после обработки, можно утверждать, что распределения радиусов близки. Сравнение характеристик экспериментальных данных приведены в таблице 2.

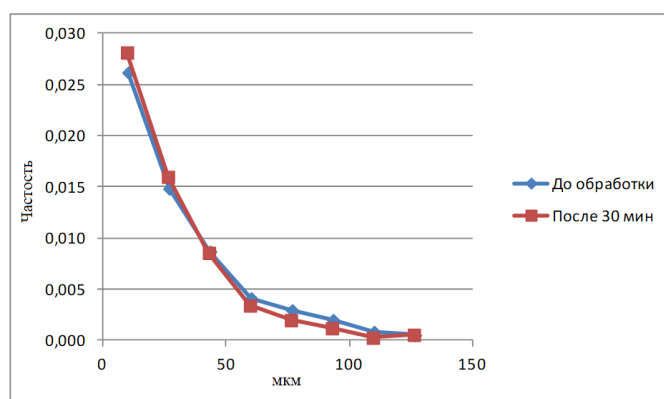
Таблица 2 – Параметры распределений радиусов режущих вершин

Параметр	Обозначение	Оптический профилометр Veeco NT9080		Профилограф-профилометр HOMMEL TESTER W55	
		До обработки	После 30 мин работы	До обработки	После 30 мин работы
Минимальный радиус, мкм	r_{min}	2,036	1,528	2,9733	3,6981
Максимальный радиус, мкм	r_{max}	134,924	134,462	141,8114	139,6514
Средний радиус, мкм	r_{cp}	30,735	26,898	28,8590	32,6814
СКО радиуса, мкм	σ_r	25,825	23,0496	24,4843	27,7112
Параметр распределения, $1/\mu\text{км}^{2/}$	λ	0,035361	0,040042	0,03749301	0,033117
Количество	n	568	843	384	149

Анализ графиков и результатов таблицы 2 показывает, что распределения близки друг к другу, что свидетельствует о стабильности процесса обработки.



а



б

а – профилограф-профилометр HOMMEL TESTER W55;

б – оптический профилометр Veeco NT9080

Рисунок 15 – Сравнение полигонов распределений

В резании главным образом принимают участие вершины с малым радиусом. Об этом свидетельствует распределение по экспоненциальному закону. Однако в выборке также присутствуют риски, оставленные вершинами с радиусом, близким к размеру зерна.

Для другой зернистости магнитно-абразивных порошков можно предположить, что кривая будет также подчиняться экспоненциальному закону. Изменяются радиусы, кривая будет более пологая. При износе может произойти изменение закона распределения в сторону гамма-распределения, или распределения Гаусса. Более точно ответить на этот вопрос можно проведя дополнительные эксперименты с изменением зернистости и времени обработки данными порошками.

4 Обсуждение и заключение

1 Анализ полученных полигонов распределения вершин до и после обработки позволяет утверждать, что распределения радиусов близки.

2 В резании главным образом принимают участие вершины с малым радиусом. Об этом свидетельствует распределение по экспоненциальному закону. Однако в выборке также присутствуют риски, оставленные вершинами с радиусом, близким к размеру зерна.

3 Для другой зернистости магнитно-абразивных порошков можно предположить, что кривая будет также подчиняться экспоненциальному закону. Изменяются радиусы, кривая будет более пологая. При износе может произойти изменение закона распределения в сторону гамма распределения, или распределения Гаусса. Более точно ответить на этот вопрос можно проведя дополнительные эксперименты с изменением зернистости и времени обработки данными порошками.

Список литературы

1 Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. – Л. ; Машиностроение. Ленингр. отд-ние. 1986. – 176 с.

2 Барон, Ю. М. Физические основы работы магнитно-абразивных материалов / Ю. М. Барон // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев, 1980. – С. 10-17.

3 Гончаров, В. Д. Прогрессивные технологические методы финишной обработки : учеб. пособие / В. Д. Гончаров. – М. : Станки, 1993. – 105 с.

4 Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 232 с.

5 Коновалов, Е. Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е. Г. Коновалов, Г. С. Шулев. – Минск : Наука и техника, 1967. – 125 с.

6 Коновалов, Е. Г. Основы новых способов металлообработки. Минск : АН БССР, 1961. 297 с.

7 Крагельский И. В. Влияние шероховатости и свойств материала на фактическую площадь касания поверхностей. – М. : Изд-во АН СССР, 1961, С. 12-15.

8 Крымский, М. Д. Распределение и уплотнение магнитноабразивного порошка в рабочем зазоре станка / М. Д. Крымский // Магнитноабразивные материалы и методы их испытания. – Киев, 1980. – С. 92-97.

9 Леонов, С. Л. Распределение радиусов режущих вершин при магнитно-абразивной обработке / С. Л. Леонов, А. М. Иконников, Д. Е. Соломин // Ползуновский альманах. 2021. № 3. С. 29-32.

10 Майборода, В. С. Основи створення і використання порошкового магнітноабразивного інструменту для фінішної тобробки фасонних поверхонь : автореф. дис. д-ра технічних наук : 05.03.01 / В. С. Майборода. ; Киев, политех, ин-т. – Киев, 2001. – 36 с.

11 Наливко, Г. Д. Некоторые свойства магнитно-абразивных порошков из

- псевдоплавленных композиций / Г. Д. Наливко // Порошковая металлургия. – 1979. – № 8. – С. 83.
- 12 Новоселов, Ю. К. Динамика формирования поверхностей при абразивной обработке : монография / Ю. К. Новоселов. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – 304 с.
- 13 Приходько, С. П. Магнитно-абразивное полирование индукторами на постоянных магнитах / С. П. Приходько, Ю. М. Барон // Автотракторное электрооборудование. – 1983. – № 5. – С. 11-14, 143.
- 14 Приходько, С. П. Магнитные индукторы для полирования наружных поверхностей вращения / С. П. Приходько // Повышение эффективности технологических процессов машиностроительного производства. – Барнаул, 1989. – С. 35, 144.
- 15 Приходько, С. П. Магнитные индукторы для полирования плоских поверхностей / С. П. Приходько // Повышение эффективности технологических процессов машиностроительного производства. – Барнаул, 1989. – С. 52.
- 16 Приходько, С. П. Моделирование процесса магнитно-абразивной обработки деталей машин на ЭВМ / С. П. Приходько // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. – Барнаул, 1987. – С. 115-119, 146.
- 17 Приходько, С. П. Роль вихревых токов в процессе магнитноабразивной обработки / С. П. Приходько // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. – Барнаул, 1989. – С. 104-107.
- 18 Приходько, С. П. Технологические закономерности магнитноабразивного полирования индукторами на постоянных магнитах / С. П. Приходько, Ю. М. Барон // Автотракторное электрооборудование. – М., 1983. – № 6. – С. 12-14.
- 19 Сакулевич, Ф. Ю. Объемная магнитно-абразивной обработка / Ф. Ю. Сакулевич, Л. М. Кожухов. – Минск : Наука и техника, 1978. – 168 – с. 156.
- 20 Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 328 с. 157.
- 21 Сакулевич, Ф. Ю., Минин, Л. К., Олендер, Л. А. Магнитноабразивная обработка точных деталей. – Мн. ; Высшая школа, 1977. – 288 с.

References

- 1 Baron, Yu. M. Magnitno-abrasive and magnetic processing of products and cutting tools. – L. ; Engineering. Leningrad. dept. 1986. – 176 p.
- 2 Baron, Yu. M. Physical bases of work of magnetic-abrasive materials / Yu. M. Baron // Magnetic-abrasive materials and methods of their testing. – Kyiv, 1980. – P. 10-17.
- 3 Goncharov, V. D. Progressive technological methods of finishing processing : textbook. allowance / V. D. Goncharov. – M. : Stanki, 1993. – 105 p.
- 4 Konovalov, E. G. Finishing parts in a magnetic field with ferromagnetic powders / E. G. Konovalov, G. S. Shulev. – Minsk : Science and technology, 1967. – 125 p.
- 5 Konovalov, E. G. Fundamentals of new metalworking methods. Minsk : AN BSSR, 1961. 297 p.
- 6 Kozhuro, L. M. Processing of machine parts in a magnetic field / L. M. Kozhuro, B. P. Chemisov. – Minsk : Science and technology, 1995. – 232 p.
- 7 Kragelsky I. V. Influence of roughness and material properties on the actual area of contact

of surfaces. – М. : Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1961, p. 12-15.

8 Krymsky, M. D. Distribution and compaction of magnetically abrasive powder in the working gap of the machine / M. D. Krymsky // Magnetically abrasive materials and methods of their testing. – Kyiv, 1980. – P. 92-97.

9 Leonov S. L. Distribution of cutting top radius in magnetic abrasive machining / S. L. Leonov, A. M. Ikonnikov, D. E. Solomin // Polzunovskiy almanac. 2021. № 3. P. 29-32.

10 Maiboroda, V. S. Fundamentals of the creation of a powder magnetic abrasive tool for cutting shaped surfaces: author. dis. Doctor of Technical Sciences : 05.03.01 / V. S. Maiboroda. ; Kyiv, polytechnic, in-t. – Kyiv, 2001. – 36 p.

11 Nalivko, G. D. Some properties of magnetic abrasive powders from pseudo-melted compositions / G. D. Nalivko // Powder metallurgy. – 1979. – № 8. – P. 83.

12 Novoselov, Yu. K. Dynamics of surface formation during abrasive processing: monograph / Yu. K. Novoselov. – Sevastopol : Sev NTU, 2012. – 304 p.

13 Prikhodko, S. P. Magnetic-abrasive polishing with inductors on permanent magnets / S. P. Prikhodko, Yu. M. Baron // Autotractor electrical equipment. – 1983. – № 5. – S. 11-14, 143.

14 Prikhodko, S. P. Magnetic inductors for polishing external surfaces of rotation / S. P. Prikhodko // Improving the efficiency of technological processes of machine-building production. – Barnaul, 1989. – P. 35, 144.

15 Prikhodko, S. P. Magnetic inductors for polishing flat surfaces / S. P. Prikhodko // Improving the efficiency of technological processes of machine-building production. – Barnaul, 1989. – P. 52.

16 Prikhodko, S. P. Modeling the process of magnetic-abrasive processing of machine parts on a computer / S. P. Prikhodko // Finishing and finishing methods and tools in mechanical engineering technology. – Barnaul, 1987. – S. 115-119. 146.

17 Prikhodko, S. P. Technological regularities of magnetic abrasive polishing with permanent magnet inductors Prikhodko, Yu. M. Baron // Autotractor electrical equipment. – М., 1983. – № 6 – S. 12-14.

18 Prikhodko, S. P. The role of eddy currents in the process of magnetic abrasive processing / S. P. Prikhodko // Finishing methods and tools in engineering technology. – Barnaul, 1989. – P. 104-107.

19 Sakulevich, F. Yu. Fundamentals of magnetic-abrasive processing / F. Yu. Sakulevich. – Minsk : Science and technology, 1981. – 328 p. 157.

20 Sakulevich, F. Yu. Volumetric magnetic-abrasive processing / F. Yu. Sakulevich, L. M. Kozhukhov. – Minsk : Science and technology, 1978. – 168 p. 156.

21 Sakulevich, F. Yu., Minin, L. K., Olender, L. A. Magnetically abrasive machining of precision parts. – Mn. ; Higher School, 1977. – 288 p.