

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-35-44



УДК 621.9.06

UDC 621.9.06

2.5.6 – технология машиностроения

**СТОХАСТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ
ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ МАГНИТНО-
АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ**

**STOCHASTIC MODELING OF
ROUGHNESS FORMATION DURING
MAGNETIC ABRASIVE TREATMENT**

Леонов Сергей Леонидович

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

Leonov Sergey Leonidovich

D. of Tech. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies of the Altai state technical University. I. I. Polzunova, Barnaul, Russian Federation

Иконников Алексей Михайлович

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

Ikonnikov Alexey Mikhailovich

C. of Tech.Sc. (Engineering), Associate Professor Engineering Technologies of the Altai state technical University. I. I. Polzunova, Barnaul, Russian Federation

✉¹**Соломин Дмитрий Евгеньевич**

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

✉¹**Solomin Dmitry Evgenevich**

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

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

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.

Ключевые слова: СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО, МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА, ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ И СЛУЧАЙНЫЕ ПАРАМЕТРЫ.

Keywords: STOCHASTIC MODELING, MONTE CARLO METHOD, MAGNETIC ABRASIVE TREATMENT, DISTRIBUTION LAW, DETERMINISTIC AND RANDOM PARAMETERS

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

При проектировании операций механической обработки часто необходимо решать задачу идентификации – определения математического описания по экспериментальным данным [1, 5]. Для детерминированных систем получение такого описания осуществляется достаточно просто: используется методики планирования экспериментов или метод наименьших квадратов в чистом виде.

Процесс механической обработки является стохастической системой. Действительно и параметры заготовки, и параметры инструмента, и режим резания содержат случайные составляющие. В этом случае и результат выполнения операции (характеристики детали — размер, шероховатость и т.п.) являются случайными, распределенными по какому-либо закону распределения. При этом закон распределения выходных характеристик определяется законами распределения (и их параметрами) входных [1-8].

Обычно аналитически "пересчитать" законы распределения входных параметров в законы распределения выходных не представляется возможным. В этом случае используют метод стохастического моделирования или метод Монте-Карло. Суть данного метода достаточно проста и напоминает проведение экспериментальных исследований [8].

Целью работы является создание стохастической математической модели формирования шероховатости и съема материала при магнитно-абразивной обработке с учетом детерминированных и случайных входных параметров.

Прежде всего составляется детерминированная часть модели преобразования случайных входных параметров операции в выходные (тоже случайные). Алгоритм стохастического моделирования заключается в следующем:

1 Для каждого из входных параметров определяется закон распределения и параметры этого закона.

2 Генерируют с помощью датчиков случайных чисел наборы случайных значений входных параметров. Таких наборов должно быть значительное количество – по крайней мере – несколько сотен.

3 По детерминированной модели рассчитываются значения выходных параметров. Так как значения входных параметров случайное, то случайными являются и значения выходных.

4 По значениям выходных параметров определяют их законы распределения и параметры этих законов.

Иногда закон распределения входных параметров известен: если значения параметра определяется большим количеством случайных факторов и явлений, то он близок к нормальному (закону распределения Гаусса). В противном случае закон распределения определяют на основе экспериментальных исследований с использованием критерия согласия χ^2 . Так же можно определить и законы распределения выходных параметров. [1,7]

Для генерации величин, распределенных по известному закону распределения, имеются готовые формулы генерации их значений. В случае отсутствия таковых для генерации можно использовать обратную функцию закона распределения: если случайная величина y распределена по закону $F(y)$, то для генерации ее значений можно использовать формулу:

$$y = F^{-1}(x), \quad (1)$$

где x распределен по равномерному закону на интервале (0; 1).

Рассмотрим приложение этого подхода для моделирования производительности и шероховатости операции магнитно-абразивной обработки. На рис. 1 приведено описание операции магнитно-абразивной обработки с указанием входных и выходных параметров процесса.



Рисунок 1 – Системный анализ операции магнитно-абразивной обработки

2 Материалы и методы

Процесс магнитно-абразивной обработки представляет собой процесс массового резания случайного количества абразивных вершин магнитных зерен. [1-14, 15-21] При этом эти вершины имеют случайные координаты как по поверхности инструмента, так и по глубине резания. Геометрические параметры режущих вершин также имеют случайные характеристики. В соответствии с этим, входными случайными параметрами операции являются: n_z – количество режущих вершин зерен; t – глубина резания каждой вершиной; ρ – радиус ее скругления.

Детерминированными параметрами являются геометрические параметры индуктора и режим резания: D – диаметр индуктора; B – ширина магнита; N_{mag} – количество магнитов в индукторе; n_m – частота вращения индуктора.

Рассмотрим подробнее случайные параметры и способы их генерации для реализации стохастического моделирования.

Экспериментально было установлено [7], что радиусы скругления режущих вершины зерен распределяются по экспоненциальному закону:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (2)$$

Для генерации радиусов, распределенных по этому закону, в соответствии с (1), используется формула:

$$\rho = -\ln(1 - X) / \lambda, \text{ мм} \quad (3)$$

где X – равномерно распределенные на интервале $[0; 1]$ числа. λ – параметр распределения (1/мм), учитывающий зернистость используемого порошка

Для расчета максимальной (фактической) глубины резания вершинами магнитно-абразивных зерен [7] использована зависимость:

$$t_\phi = \frac{0,102 F k_d}{2\pi\rho(HB)}, \text{ мм} \quad (4)$$

где F – нормальная составляющая силы резания (н), рассчитываемая методом конечных элементов, с учетом размера магнитно-абразивных зерен,

k_d – коэффициент, учитывающий динамические явления при резании ($k_d < 1$).

ρ – радиус округления режущей вершины (мм),

HB – твердость заготовки по Бринеллю (кг/мм^2).

Ю. К. Новоселовым [2] доказано, что распределение глубины резания зернами при абразивной обработке осуществляется по закону:

$$F(t) = \left(\frac{t_\phi - t}{t_\phi} \right)^{1,5}. \quad (5)$$

При моделировании для генерации случайных значений глубины резания каждым зерном в соответствии с (1) используется формула:

$$t = t_\phi (1 - X^{1/1,5}), \text{ мм.} \quad (6)$$

где X – равномерное распределение в пределах от 0 до 1.

Магнитно-абразивные зерна имеют сложную нерегулярную геометрию. Поэтому на количество режущих вершин влияет большое число случайных факторов, распределенных по различным законам распределения. Поэтому положим, что количество режущих вершин на поверхности инструмента n_z (шт/мм²) подчиняется нормальному закону с параметрами \bar{n}_z и σ_n . Если считать, что основные значения n_z расположены в диапазоне от $n_{z \min}$ до $n_{z \max}$, для вычисления параметров распределения можно использовать формулы:

$$\bar{n}_z = \frac{n_{z \min} + n_{z \max}}{2}, \quad (7)$$

$$\sigma_n = \frac{n_{z \max} - n_{z \min}}{6}. \quad (8)$$

Последнее выражение следует из правила трех сигм.

Для генерации значений, распределенных по нормальному закону, можно использовать формулу [7]:

$$n_z = \left(\sum_{i=1}^{12} x_i - 6 \right) \sigma_n + \bar{n}_z.$$

Значения коэффициента стружкообразования функционально связаны со свойствами обрабатываемого металла и соотношением глубины резания и радиуса режущей вершины

$\Pi = \frac{t}{p}$. На основе экспериментальных данных были получены формулы [5]:

$$k_c = \begin{cases} 0, & \Pi \leq \Pi_0 \\ k_{c \max} \{1 - \exp[-5,5(\Pi - \Pi_0)]\}, & \Pi > \Pi_0 \end{cases}, \quad (9)$$

где $\Pi_0 = 309000 (10H_v)^{-1,89}$ – коэффициент, определяющий начальные условия резания;

$k_{c \max} = 0,34t^{0,56}V^{0,08}$ – максимальный коэффициент стружкообразования.

При этом глубина резания и p задаются в мкм, а скорость в м/с.

Определение шероховатости и съема металла реализуется посредством стохастического моделирования согласно разработанному алгоритму, рис. 2.

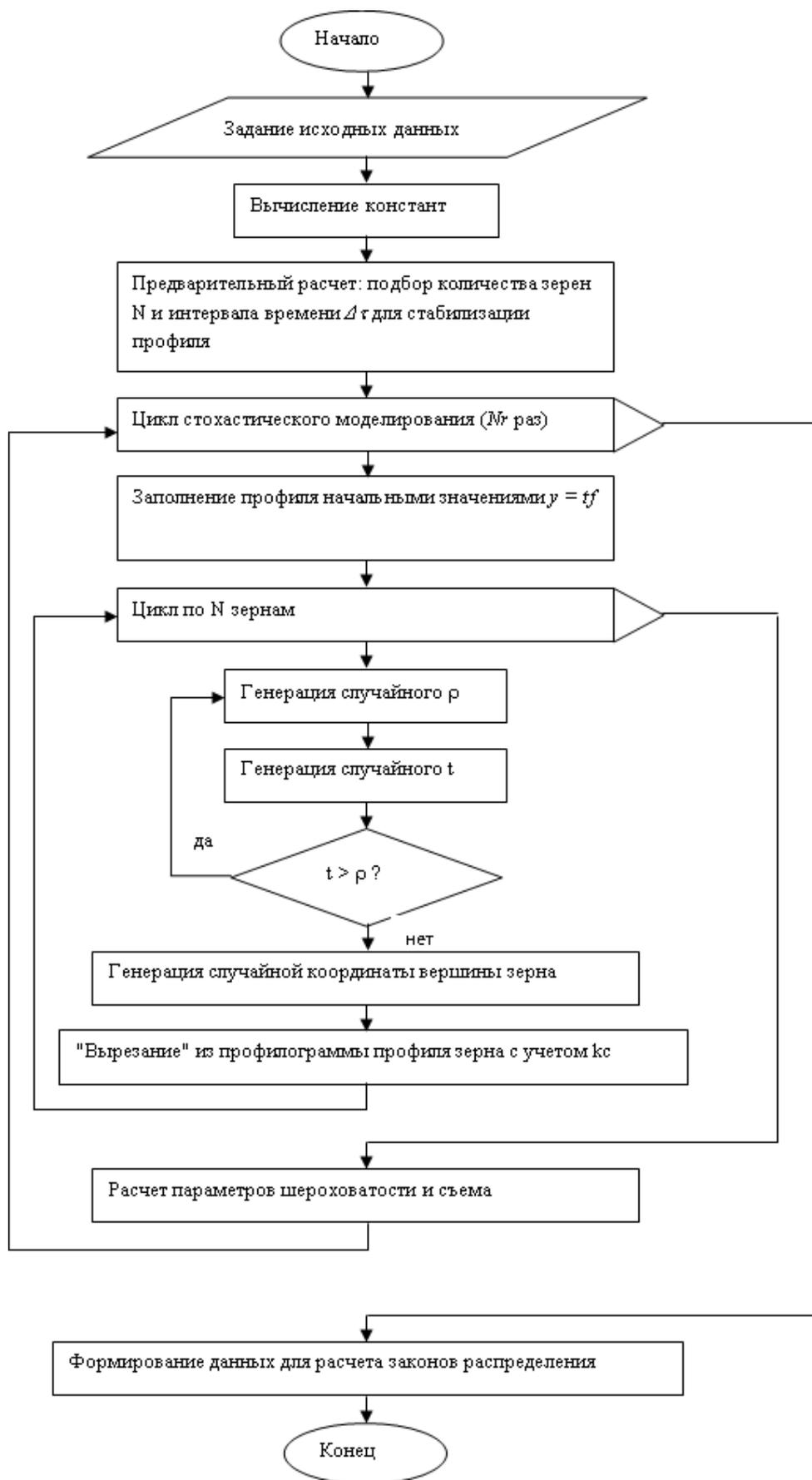


Рисунок 2 – Алгоритм стохастического моделирования

3 Результаты исследований

Исходными данными являются t_f , λ , n_z , параметры индуктора (D , B , N_{mag}) и частота его вращения n . Само стохастическое моделирование заключается в многократном расчете профилограммы, которая формируется за счет съема металла режущими вершинами с учетом коэффициента стружкообразования. Для каждой режущей вершины зерна генерируется случайное значение ее радиуса (3), случайная глубина резания (4) и случайное положение вершины вдоль профилограммы. Базовая длина в расчетах принималась равной 1 мм.

Для корректного получения профилограммы на первом этапе расчета подбирается время стабилизации профиля и съема металла. Затем в цикле стохастического моделирования используется этот промежуток времени. Время стабилизации профиля подбирается таким, чтобы величина съема металла была отличной от нуля.

Для каждой профилограммы рассчитываются параметры шероховатости (высотные, шаговые и относительная опорная длина профиля). По этим значениям составляется таблица, по которой строится полигон распределения. По критерию χ^2 проверяется соответствие заданному закону распределения.

В таблице 1 представлены входные параметры математической модели

Таблица 1 – Входные параметры математической модели

Название параметра	Обозначение	Значение
Количество расчетов	N_r , шт	300
Параметр распределения радиусов режущей вершины	λ , 1/мм	30
Ширина магнита	B , мм	5
Диаметр магнита	D , мм	20
Количество магнитов	N_{mag} , шт	4
Количество режущих зерен на 1 мм ² поверхности индуктора	n_z , шт/мм ²	9
Частота вращения индуктора	n_m , об/мин	200

Расчеты проводились для обработки без подачи, зазор между индуктором и заготовкой 1 мм.

После проведения расчетов был получен набор профилограмм. На рис. 3 пример профилограммы.



Рисунок 3 – Пример полученной профилограммы

На основе массива профилограмм были получены полигоны распределения шероховатости и съема материала. Значение шероховатости и съема материала показаны в таблице 2

Таблица 2 – Результаты расчета математической модели

Шероховатость, мкм	Съем, мкм/с
$Ra_{min}=0,00239$	$D_{min}=0,01554$
$Ra_{max}=0,00348$	$D_{max}=0,03339$
$Ra_{sr}=0,00296$	$D_{sr}=0,02706$
$\sigma_{Ra}=0,000180$	$\sigma_D=0,00337$

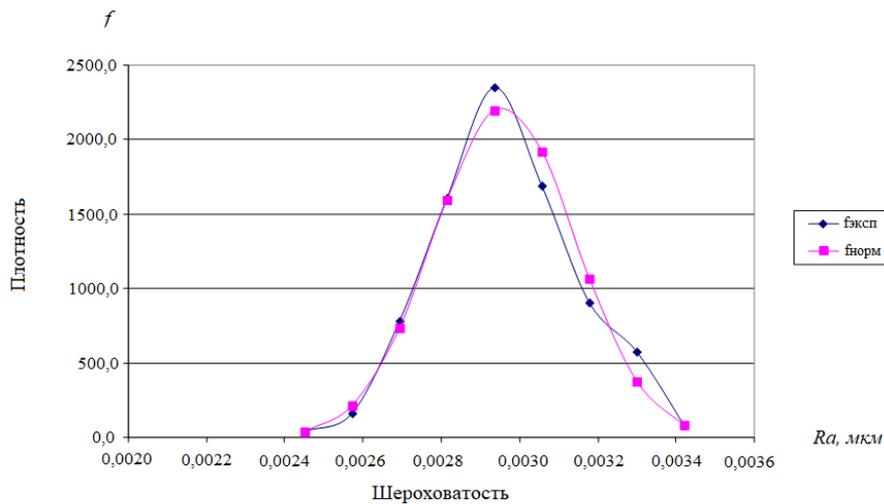


Рисунок 4 – Полигон плотности распределения шероховатости

Произведем сравнение заданному закону распределения по критерию χ^2 .

Расчетное значение $\chi^2 = 4,47$, табличное $\chi^2 = 12,6$. Распределение $\chi^2_{расч} < \chi^2_{табл}$ – соответствует нормальному закону распределения.

Если на чертеже детали задано максимальное значение шероховатости, то по аналитической плотности распределения можно спрогнозировать вероятность получения годной детали (площадь под кривой плотности распределения в заданном диапазоне Ra).

Для съема материала полигон распределения не подчиняется нормальному закону распределения. Расчетное значение $\chi^2 = 18,1$, табличное $\chi^2 = 15,5$.

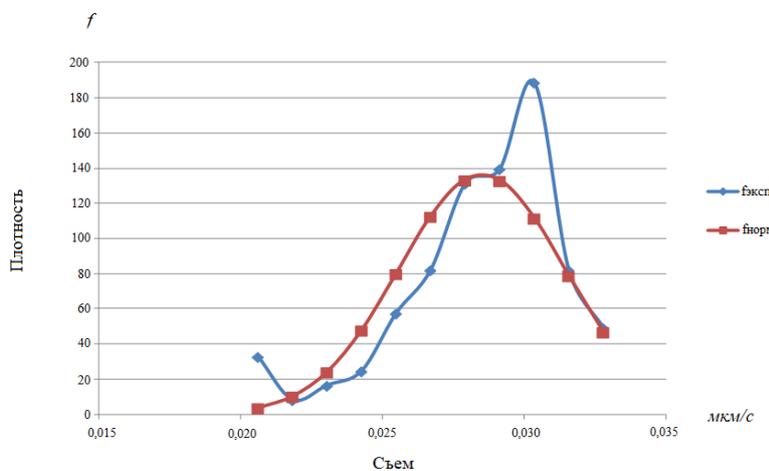


Рисунок 5 – Полигон плотности распределения съема материала

4 Обсуждение и заключения

1 Результатом стохастического моделирования является профилограмма обработанной поверхности, что позволяет рассчитать любые параметры шероховатости и производительности процесса обработки.

2 Стохастическое моделирование позволяет прогнозировать не только среднее значение выходных параметров, но и их разброс вплоть до получения полигонов распределения.

3 Установление законов распределения параметров шероховатости и съема металла позволяет прогнозировать вероятность получения годных деталей на этапе технологической подготовки производства.

Список литературы

1 Акулович, Л. М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2019. – 272 с.

2 Акулович, Л. М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. - Минск : БГАТУ, 2013. - 372 с.

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

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

5 Иконников, А. М. Теоретические основы обеспечения качества и повышения производительности магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.02.07 311 с. 2022 г. с 146-155

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

7 Леонов, С.Л. Установление параметров распределения радиусов режущих вершин магнитно-абразивных зерен / Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. // Воронежский научно-технический вестник. № 3. С. 24-35.

8 Новоселов, Ю. К. Динамика формирования поверхностей при абразивной обработке: монография / Ю. К. Новоселов. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – 304 с

9 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.

10 Сакулевич, Ф. Ю. Объемная магнитно-абразивной обработка / Ф. Ю. Сакулевич, Л. М. Кожухов. – Минск: Наука и техника, 1978. – 168 с. 156.

11 Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 328 с. 157.

12 Сорокин В.В., Дараган А.Ф. Контроль состояния режущего инструмента в станочных системах // Наука и современность, 2010: с. 272

13 Baljinder Singh, Charanjit Singh Kalra Optimization of magnetic abrasive finishing parameters during finishing of brass tube / International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Volume: 02 Issue: 04 / July-2015

14 Dorri MM, Pascale C, Stephane T, Diego M (2018) Enhancing the barrier properties of a fluorocarbon plasma-deposited coating by producing an Interface of amorphous oxide layer on 316L stainless steel for stent applications. Surface and Coatings Technology 347: 209-216

15 Eggermont P.P., LaRiccia V.N. Maximum Penalized Likelihood Estimation: Volume II: Regression / Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009. - 580p.

- 16 Harish Kumar, Sehijpal Singh, Pardeep Kumar, "Magnetic Abrasive Finishing- A Review" Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT)Vol. 2 Issue 3, March 2013.
- 17 Ming Chang, Fu & Tsai, Tung-Hsien & Han Chiang, Sheng. (2011). Sensitivity Analysis of Magnetic Abrasive Finishing Process Parameters. Advanced Materials Research. 328-330. 868-880. [10.4028/www.scientific.net/AMR.328-330.868](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.328-330.868).
- 18 Murat Sarikaya a, Abdulkadir Güllü, "Taguchi Design And Response Surface Methodology Based Analysis Of Machining Parameters In CNC Turning Under MQL" Journal of Cleaner Production 65 (2014) 604e616.
- 19 T.C, Kanish & Kuppan, P & Narayanan, Syama & Denis Ashok, S. (2014). A Fuzzy Logic based Model to Predict the Improvement in Surface Roughness in Magnetic Field Assisted Abrasive Finishing. Procedia Engineering. 97. [10.1016/j.proeng.2014.12.349](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.349).
- 20 Xu, Jiaye, Yanhua Zou, and Huijun Xie. 2021. "Investigation on the Finishing Characteristics of a Magnetic Abrasive Finishing Process with Magnetic Abrasive Slurry Circulation System" Machines 9, no. 9: 195. <https://doi.org/10.3390/machines9090195>.
- 21 Zhang, J.; Hu, J.; Wang, H.; Kumar, A.S.; Chaudhari, A. A novel magnetically driven polishing technique for internal surface finishing. *Precis. Eng.* 2018, 54, 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.05.001>

References

- 1 Akulovich, L. M. Magnetic abrasive treatment of complex surfaces of agricultural machinery parts / L. M. Akulovich, L. E. Sergeev. – Minsk : BGATU, 2019. –272 p.
- 2 Akulovich, L. M. Technology and equipment of magnetic abrasive treatment of metal surfaces of various profiles L. M. Akulovich, L. E. Sergeev. - Minsk : BGATU, 2013. - 372 p.
- 3 Baron, Yu. M. Magnetic-abrasive and magnetic processing of products and cutting tools. - L.; Mechanical engineering. Leningr. otd-nie. 1986. - 176 p.: il
- 4 Baron, Yu. M. Physical fundamentals of magnetic abrasive materials / Yu. M. Baron // Magnetic abrasive materials and methods of their testing. – Kiev, 1980. – pp. 10-17.
- 5 Ikonnikov, A. M. Theoretical foundations of quality assurance and productivity improvement of magnetic abrasive treatment of complex surfaces: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences: 05.02.07 311 p. 2022 p. 146-155
- 6 Konovalov, E. G. Finishing of parts in a magnetic field with ferromagnetic powders / E. G. Konovalov, G. S. Shulev. – Minsk : Science and Technology, 1967. – 125 p.
- 7 Leonov, S. L. Determination of the parameters of the distribution of the radii of the cutting vertices of magnetically abrasive grains / Leonov S.L., Ikonnikov A.M., Solomin D.E. // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. No. 3. pp. 24-35.
- 8 Novoselov, Yu. K. Dynamics of the formation of surfaces during abrasive processing: monograph / Yu. K. Novoselov. – Sevastopol : SevNTU, 2012. – 304 s
- 9 Prikhodko, S. P. Modeling of the process of magnetic abrasive machining of machine parts on a computer / S. P. Prikhodko // Finishing and finishing methods of processing and tools in mechanical engineering technology. – Barnaul, 1987. – pp. 115-119. 146.
- 10 Sakulevich, F. Y. Volumetric magnetic abrasive treatment / F. Y. Sakulevich, L. M. Kozhukhov. – Minsk: Science and Technology, 1978. – 168 p. 156.
- 11 Sakulevich, F. Yu. Fundamentals of magnetic abrasive processing / F. Yu. Sakulevich. - Minsk: Science and Technology, 1981. – 328 p. 157.
- 12 Sorokin V.V., Daragan A.F. Control of the state of cutting tools in machine systems // Science and modernity, 2010: p. 272
- 13 Baljinder Singh, Charanjit Singh Kalra Optimization of magnetic abrasive finishing parameters during finishing of brass tube / International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Volume: 02 Issue: 04 / July-2015

- 14 Dorri MM, Pascale C, Stephane T, Diego M (2018) Enhancing the barrier properties of a fluorocarbon plasma-deposited coating by producing an Interface of amorphous oxide layer on 316L stainless steel for stent applications. *Surface and Coatings Technology* 347: 209-216
- 15 Eggermont P.P., LaRiccia V.N. Maximum Penalized Likelihood Estimation: Volume II: Regression / Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009. - 580p.
- 16 Harish Kumar, Sehijpal Singh, Pardeep Kumar, "Magnetic Abrasive Finishing- A Review" *Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT)* Vol. 2 Issue 3, March 2013.
- 17 Ming Chang, Fu & Tsai, Tung-Hsien & Han Chiang, Sheng. (2011). Sensitivity Analysis of Magnetic Abrasive Finishing Process Parameters. *Advanced Materials Research*. 328-330. 868-880. [10.4028/www.scientific.net/AMR.328-330.868](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.328-330.868).
- 18 Murat Sarıkaya a, Abdulkadir Güllü, "Taguchi Design And Response Surface Methodology Based Analysis Of Machining Parameters In CNC Turning Under MQL" *Journal of Cleaner Production* 65 (2014) 604e616.
- 19 T.C, Kanish & Kuppan, P & Narayanan, Syama & Denis Ashok, S. (2014). A Fuzzy Logic based Model to Predict the Improvement in Surface Roughness in Magnetic Field Assisted Abrasive Finishing. *Procedia Engineering*. 97. [10.1016/j.proeng.2014.12.349](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.349).
- 20 Xu, Jiaye, Yanhua Zou, and Huijun Xie. 2021. "Investigation on the Finishing Characteristics of a Magnetic Abrasive Finishing Process with Magnetic Abrasive Slurry Circulation System" *Machines* 9, no. 9: 195. <https://doi.org/10.3390/machines9090195>.
- 21 Zhang, J.; Hu, J.; Wang, H.; Kumar, A.S.; Chaudhari, A. A novel magnetically driven polishing technique for internal surface finishing. *Precis. Eng.* 2018, 54, 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.05.001>

© Соломин Д. Е., Леонов С.Л., Иконников А. М., 2023