

Обработка плоских поверхностей магнитно-абразивным методом торцевыми головками на постоянных магнитах 3. Влияние типа рабочих головок на эффективность магнитно-абразивной обработки

В. С. Майборода¹ • Д. Ю. Джулий¹ • А. И. Зелинко² • А. О. Буриков¹

Received: 23 February 2021 / Accepted: 24 May 2021

Аннотация. Выполнены исследования процесса магнитно-абразивной обработки (МАО) ферромагнитных плоских поверхностей торцевыми головками трех типов. Определен характер изменения величины магнитной индукции в зонах обработки, исследовано влияние технологических параметров процесса обработки, таких как скорость подачи рабочих головок, частоты их вращения относительно собственной оси, величины рабочих зазоров на изменение параметров микронеровностей обрабатываемых поверхностей – S_a , S_p , S_v , частотного распределения высот микронеровностей и величины опорной поверхности профиля. Показано, что уровень достигаемой после МАО шероховатости практически одинаковый и не превышает при рациональных условиях процесса МАО величины $S_a = 0,05–0,07$ мкм, $S_p = 0,2$ мкм и $S_v = 0,39$ мкм с той лишь разницей, что процесс МАО головками типа “щетка-полупор” реализуется с повышенной производительностью в особенности с точки зрения снижения волнистости и отдельных элементов наследственности обработки, определяемой такими факторами, как глубина и величина подачи при фрезеровании. Показана кинетика формирования микропрофиля поверхностей при различных технологических условиях процесса МАО.

Ключевые слова: Магнитно-абразивная обработка, магнитные головки торцевого типа, постоянные магниты, рабочие поверхности, эффективность, шероховатость.

Введение

Финишная обработка плоских ферромагнитных деталей на стандартном, универсальном металлорежущем оборудовании связана с необходимостью использования особого инструмента, который обладает комплексом специальных свойств, предусматривающих способность подобного инструмента сохранять на протяжении всего цикла обработки свою форму, абразивную и полирующую способности, реализовывать возможность отвода из зоны резания продуктов обработки. Выполнять подобные требования, предъявляемые к инструменту, позволяет абразивный инструмент с подвижно скоординированными элементами, которые удерживаются в рабочем состоянии магнитным полем-так называемой “виртуальной” связкой. Подобным образом, сформированный в про-

цессе обработки абразивный инструмент-магнитно-абразивный инструмент (МАИ) обладает уникальными возможностями, позволяющими выполнять финишную обработку различных труднообрабатываемых материалов с высокой производительностью в условиях повышенного теплоотвода [1, 2]. Использование постоянных высокомоментных магнитов в конструкциях технологических приспособлений, применяемых при создании специального инструмента в виде отдельных головок кольцевого, торцевого и радиального типов, обеспечивающих возможность формирования “виртуальной” связки открывает широкие возможности при их эксплуатации на станках без существенных конструктивных и технологических ограничений. Однако подобный подход к процессам финишной обработки с использованием созданных магнитных головок на постоянных магнитах требует достаточно корректного подхода при разработке конструкций самих головок, а именно определенных геометрии рабочих поверхностей, типа и формы самих магнитов, их расположения в корпусе головок, его формы, наличия на головках определенных конструк-

✉ D. Yu. Dzhulii
dmytro.dzhulii@gmail.com

¹ КПИ им. Игоря Сикорского, Киев, Украина

² Сообщество технологии изготовления и развития в Шмалькальден, Германия

тивных элементов, концентраторов магнитного поля и особой геометрии рабочих поверхностей.

Подобные требования, предъявляемые к магнитным головкам, прежде всего определяются необходимостью выполнения в процессе их эксплуатации требований необходимых для проведения эффективно-го процесса магнитно-абразивной обработки [3, 4].

Анализ ранее выполненных исследований по финишной обработке плоских поверхностей показал целесообразность использования магнитных головок торцевого типа [5–10].

Исследования влияния формы рабочих поверхностей магнитных головок, а также типа и формы магнитов, технологических условий обработки, типов применяемых магнитно-абразивных порошков [11–13] показали, что наилучшие результаты имеют место при использовании для формирования МАИ порошков типа Ферромаг с осколочной формой частиц, полученных методом распыления из расплава с последующим их размолотом и классификацией. Показано, что тип формирующегося на торцевой рабочей поверхности магнитной головки магнитно-абразивного инструмента во многом определяет рациональные условия обработки, необходимые для достижения минимальной шероховатости. Установлено, что при использовании магнитных головок, формирующих МАИ в виде “щеткой” [11] наилучшие результаты получены при обработке стали 45 при величине магнитной индукции в рабочих зазорах 0,28 Тл, в то время как при формировании МАИ типа “полутор” эта величина составляет 0,2 Тл. Такое различие в получаемых результатах объясняется тем фактом, что при использовании указанных типов головок имеет место различное расположение частиц в зоне обработки по отношению как к обрабатываемой поверхности, так и к рабочей поверхности головок. Для МАИ, сформированного в виде “щеткой”, имеет место преимущественное расположение частиц порошка и их квазистабильных представительских объемов [14], сформированных из отдельных частиц в виде столбиков, направленных от рабочей поверхности головки к обрабатываемой поверхности. При этом частички расположены своими наибольшими осями вдоль линий магнитного поля, по нормали к ферромагнитной обрабатываемой поверхности. При использовании головки, с сформированным МАИ типа “полутор”, положение отдельных частиц несколько отлично от нормального расположения и составляет некоторый угол с обрабатываемой поверхностью, величина которого будет зависеть как от магнитной индукции в зоне обработки, так и от величины рабочего зазора. Для “полутора” вероятность поворота частиц в процессе обработки будет выше, чем у МАИ типа “щетка”, что свидетельствует о лучшем “восстановлении” режущих свойств МАИ за счет обновления режущих кромок и повышенной способностью МАИ к “самозатачиванию”. Подобные утверждения подтверждаются

результатами исследований, приведенных в [12] из анализа изменения величины относительной шероховатости – $\Delta Ra/Ra_{исх.}$, величине параметра Ra , получаемого после магнитно-абразивной обработки [11]. Кроме этого, при малых подачах использование головки типа “полутор” обеспечивает лучшее выхаживание поверхности абразивными микровыступами, расположенными на поверхности X частиц вдоль их больших осей, где радиусы округления микровыступов будут больше.

Учитывая указанные особенности формирования МАИ на рабочих поверхностях торцевых магнитных головок целесообразным будет проанализировать эффективность процесса магнитно-абразивной обработки головками, которые объединяют позитивные свойства рассмотренных выше головок, т.е. головки, которые формируют на рабочей поверхности МАИ в виде “щетка” и в виде “полутор” одновременно. Для реализации такой конструкции магнитная головка формировалась из комбинации двух магнитов Nd-Fe-B таким образом, что в центре устанавливался цилиндрический магнит диаметром 23 мм, а кольцевой цилиндрический магнит с аналогичной высотой через немагнитную медную вставку располагался соосно внутренним на периферии. Таким образом на рабочей поверхности головки-ее торце формировался МАИ типа “щетка + полутор”. Следует отметить, что формирующийся на периферии головки МАИ выполняет роль выступа на крышке головки, препятствующей выбрасыванию порошка из зоны обработки и создающий зону дополнительного заклинивания, что стимулирует повышенную эффективность процесса обработки [12].

Как отмечалось выше важным фактором при использовании торцевых магнитных головок будет характер изменения величины магнитной индукции – B вблизи рабочей плоскости головки в различных участках рабочего зазора. Результаты выполненных замеров величины магнитной индукции для головок, формирующих МАИ типа “щетка”, “полутор” и “щетка + полутор” приведены на рис. 1 совместно со схематичным представлением конструкций головок.

Анализ изменения величины магнитной индукции вблизи рабочих поверхностей различных головок показал, что наиболее предпочтительным будет изменение магнитного поля, характерное для головки типа “щетка + полутор”. Именно для данного типа имеет место наибольшие значения величины B и количество зон концентрации магнитного потока, где происходит наиболее активный процесс МАО. Подтверждением этого являются результаты, приведенные в [11] по обработке плоскостей головками разных типов без их поперечной подачи, т.е. когда головка вращается длительное время в одном месте. Однако, экспериментальных результатов полученных при эксплуатации головок подобного типа в литературе не приведено. Поэтому целью данной работы было исследование

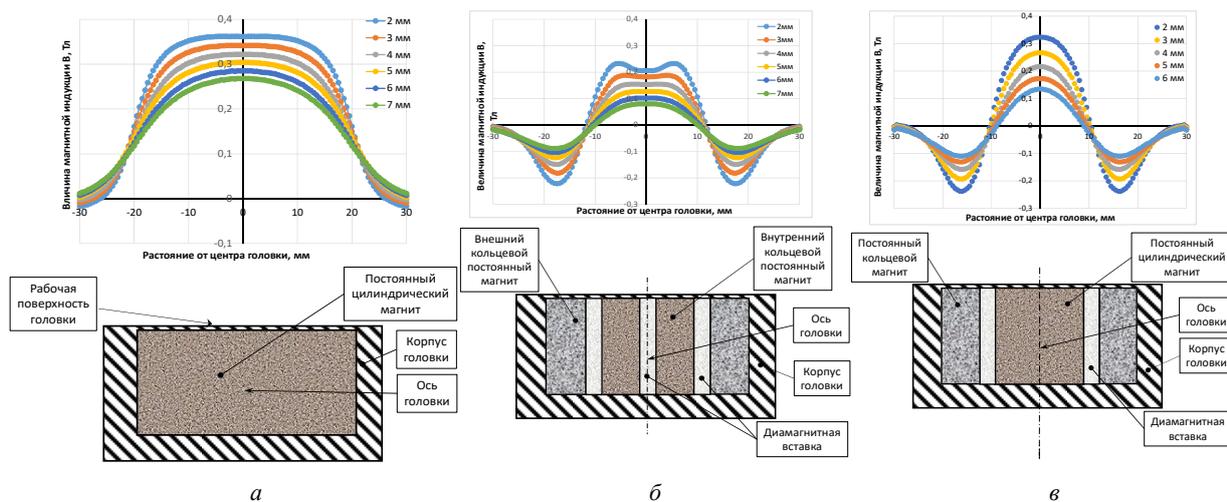


Рис. 1. Характер изменения магнитной индукции в рабочих зазорах магнитной головки на разных расстояниях от рабочей поверхности головки типа “щетка” – (а), “полупор” – (б), “щетка + полупор” – (в)

особенностей обработки ферромагнитных плоских поверхностей торцевыми головками типа “щетка + полупор”.

Экспериментальные исследования выполняли при обработке плоских поверхностей на образцах из ферромагнитной стали 45, полученных после операции торцевого фрезерования. Сравнение обработанных методом МАО поверхностей и поверхностей после фрезерования выполняли по результатам изменения параметров шероховатости таких как Sa , Sp , Sv , частотное распределение высот микровыступов и величина опорной поверхности профиля, контролируемых на квадратных участках 2×2 мм, на микроскопе NanoFocus. С учетом результатов, представленных в [11–13] в качестве магнитно-абразивного порошка использовали Ферромап с размером частиц 630/400 мкм. Варьировали величину рабочего зазора в диапазоне 1,5–5 мм, частоту вращения торцевой головки 500–1900 об/мин, скорость поперечной подачи головки при обработке 5–50 мм/мин.

После торцевого фрезерования формировалась поверхность с параметрами

$$Sa = 0,75 \dots 1,6 \text{ мкм}, Sp = 1,5 \dots 3,3 \text{ мкм},$$

$$Sv = 3,85 \dots 5,1 \text{ мкм}.$$

Внешний вид (3D изображения), частотное распределение высот микронеровностей и величина опорной поверхности профиля представлены на рис. 2.

Установлено, что глубина впадин на поверхности после фрезерования приблизительно в 2 раза больше, чем высота выступов.

На первом этапе исследовали влияние величины магнитного зазора на получаемую после МАО шероховатость, высоту выступов и глубину впадин. Полученные результаты (рис. 3)

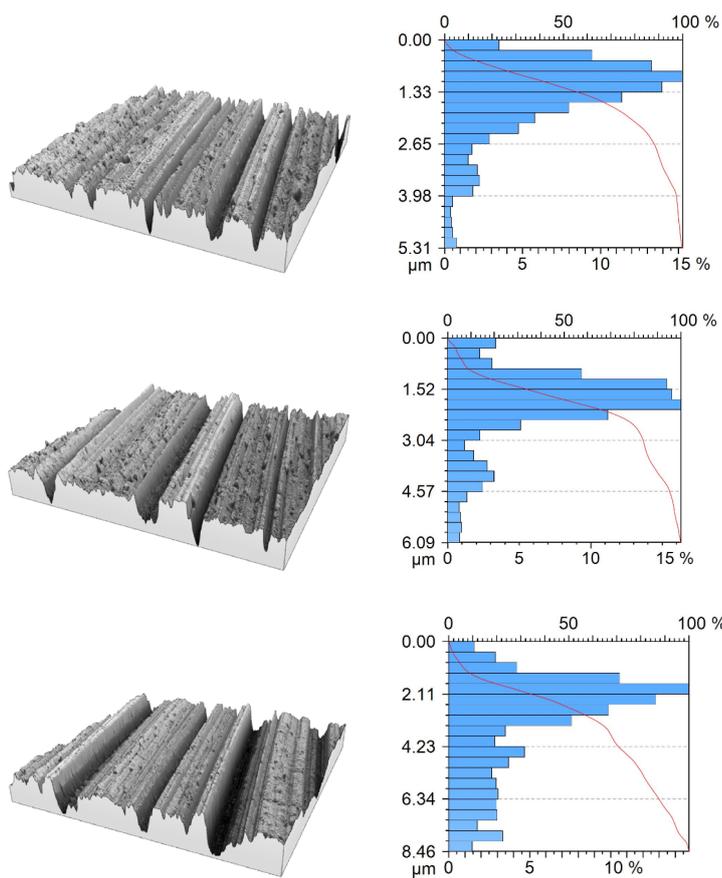


Рис. 2. 3D изображения, частотное распределение высот микронеровностей и величина опорной поверхности профиля, полученной после торцевого фрезерования

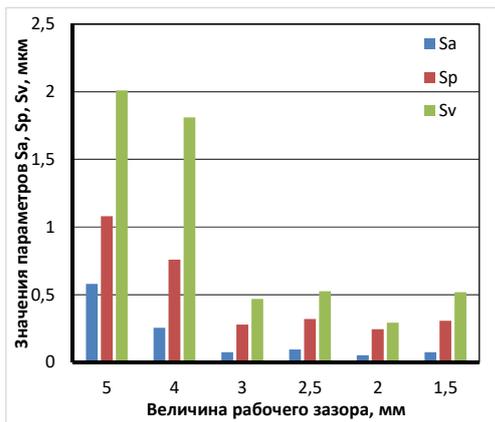


Рис. 3. Изменение величины параметров микропрофиля поверхности S_a , S_p , S_v в зависимости от величины рабочего зазора при MAO

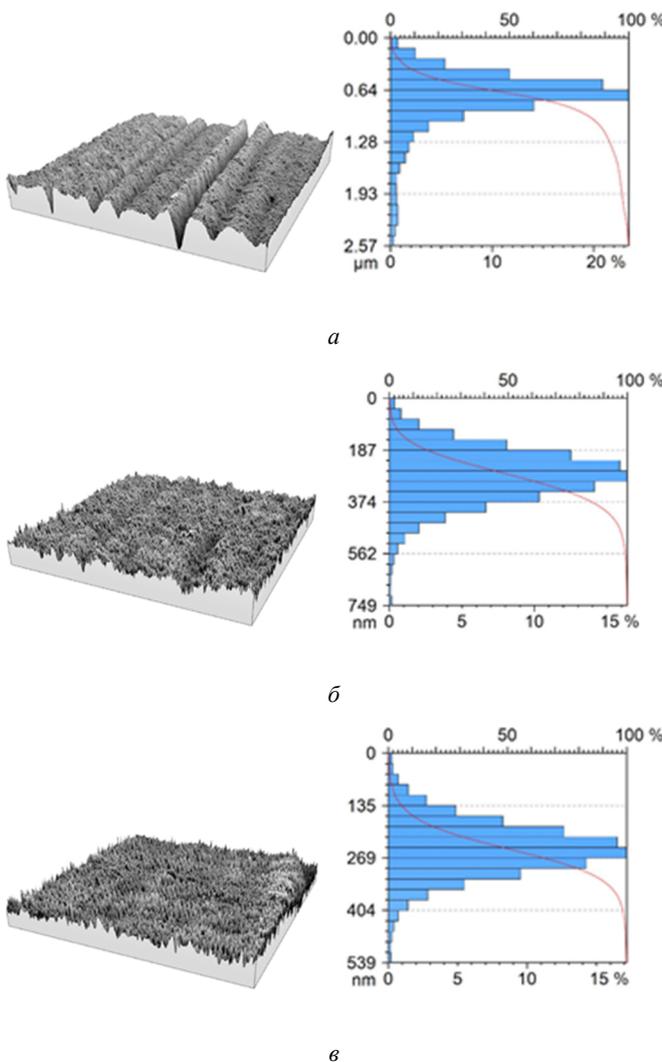


Рис. 4. 3D изображения, частотное распределение высот микронеровностей и величина опорной поверхности профиля, полученной после MAO с величиной рабочего зазора 4 мм – (а), 3 мм – (б) и 2 мм – (в)

показали, что наименьшие значения параметров формируются при обработке с величиной рабочего зазора 2 мм.

Отметим, что указанные выше данные подтверждают, установленные ранее результаты, приведенные в [11, 13]. Важно отметить, что при величинах рабочих зазоров в диапазоне 2–3 мм осуществляется активная обработка микропадин и снижение волнистости поверхности, формируемой на стадии торцевого фрезерования.

Внешний вид (3D изображения), частотное распределение высот микронеровностей и зависимости изменения опорной поверхностей профиля после MAO с различной величиной рабочих зазоров представлены на рис. 4.

Анализ влияния скорости вращения рабочей головки на формируемые параметры S_a , S_p , S_v был выполнен при величине рабочего зазора 3 мм и подаче головки 10 мм/мин (рис. 5). Установлено, что

наименьшие значения указанных параметров характерны при MAO со скоростями вращения 500–1000 об/мин. Увеличение скорости вращения головок более 1000 об/мин приводит к тому, что изменяется механизм взаимодействия элементов MAI с обрабатываемыми поверхностями – происходит активное проскальзывание и поворот частиц ферроабразивного порошка относительно обрабатываемой поверхности, что не обеспечивает благоприятных условий для протекания процессов микрорезания и полирования. Отметим, что скорости вращения головок, при которых происходит активный проворот частичек в зоне контакта MAI с обрабатываемой поверхностью совпадают с результатами, приведенными в [14] при исследованиях реологических характеристик MAI. При указанных скоростях вращения MAI не успевает восстанавливать свою форму, а значит и не выполняет активной и эффективной обработки.

Исследования влияние скорости подачи головки при MAO показали, что при ско-

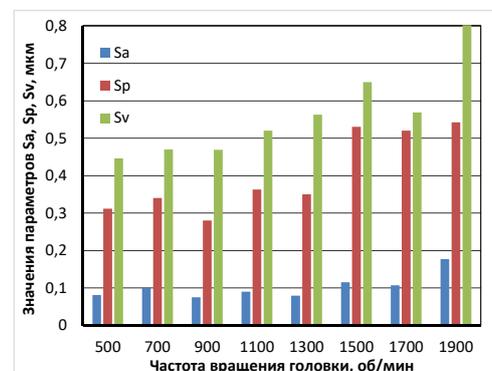


Рис. 5. Изменение величины параметров микропрофиля поверхности S_a , S_p , S_v в зависимости от величины частоты вращения торцевых головок

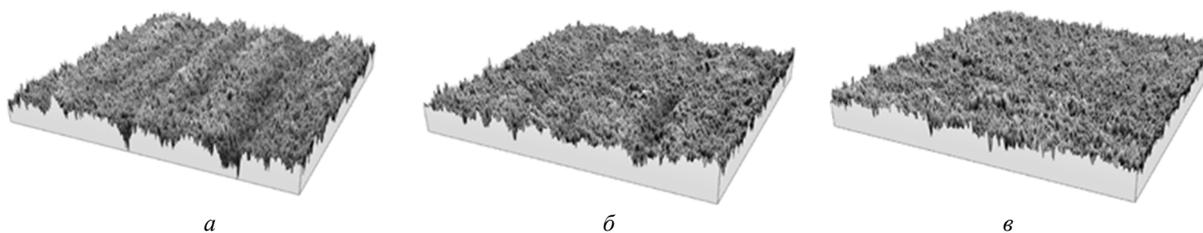


Рис. 6. 3D изображения поверхности после МАО с различной скоростью подачи рабочей головки: а) 15 мм/мин, б) 10 мм/мин, в) 5 мм/мин

ростях подачи 20, 30 и 50 мм/мин происходит преимущественное диспергирование вершин микронеровностей шероховатой поверхности без активной обработки впадин. При скоростях подачи 5–15 мм/мин реализуется полная располировка профиля с удалением

элементов наследственности обработки, полученной при фрезеровании. Характер уменьшения высоты микронеровностей и отдельных элементов волнистости приведен на рис. 6.

Изменение параметров S_a , S_p , S_v при различных скоростях подачи приведены на рис. 7.

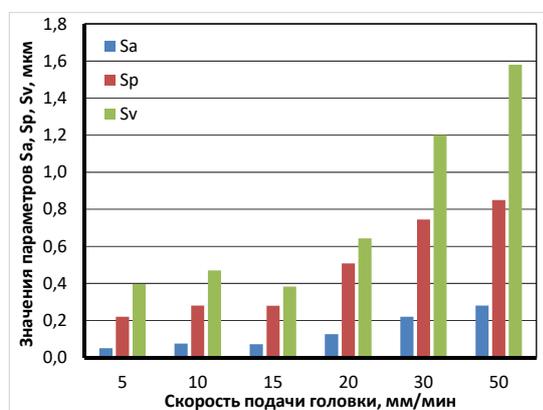


Рис. 7. Изменение величины параметров микропрофиля поверхности S_a , S_p , S_v в зависимости от величины скорости подачи торцевых головок при МАО

Выводы

Сравнение полученных результатов с данными изменения параметров S_a , S_p , S_v , полученными при МАО головками типа “полотор” и “щетка” показало, что для всех трех типов головок уровень достигаемой после МАО шероховатости практически одинаковый с той лишь разницей, что процесс МАО головками типа “щетка-полотор” реализуется с повышенной производительностью в особенности с точки зрения снижения волнистости и отдельных элементов наследственности обработки, определяемой такими факторами, как глубина и величина подачи при фрезеровании.

References

- [1] F.Yu. Sakulevich, *Osnovy magnitno-abrazivnoi obrabotki*, Minsk, Belarus: Nauka i tekhnika, 1981.
- [2] Yu.M. Baron, *Magneto-abrasive and magnetic machining of products and cutting tools*, Baron, Leningrad: Mashinostroenie, 1986.
- [3] V.S. Maiboroda, I.V. Slobodyanyuk and D.Yu. Dzhulii, *Magneto-abrasive machining of parts with complex shape*, Zhitomir, Ukraine: PP “Ruta”, 2017.
- [4] V.S. Maiboroda, “Investigation of the properties of a magneto-abrasive tool formed from two fractional mixtures of powders during magneto-abrasive machining in large magnetic gaps”, *Technological systems*, Vol. 1(37), pp. 40–55, 2007.
- [5] L. Nagdeve, V.K. Jain and J. Ramkumar, “Nanofinishing of freeform/sculptured surfaces: state-of-the-art”, *Manufacturing Review*, Vol. 5, pp. 20, 2018. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2018005>
- [6] K. Harsh, G. Vishwas, “Magnetorheological nano-finishing of diamagnetic material using permanent magnets tool”, *Precision Engineering*, Vol. 51, pp. 30–39, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.07.003>
- [7] A. Chaurasia and V. Wankhede, “Magnetic abrasive finishing of inconel 718 super alloy using permanent magnet”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 05, pp. 1165–1168, 2018.
- [8] S. Mousa, “Improvement the Hardness of Stainless Steel 321 by Magnetic Abrasive Finishing Process”, *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, Vol. 20, No. 4, pp. 838–845, 2017.
- [9] M.S. Uddin, V. Santos and R. Marian, “Interplay of Process Variables in Magnetic Abrasive Finishing of AISI 1018 Steel Using SiC and Al₂O₃ Abrasives”, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 3(2), pp. 18, 2019. <https://doi.org/10.3390/jmmp3020029>

- [10] X. Teng *et al.*, “Study on magnetic abrasive finishing of AlSi10Mg alloy prepared by selective laser melting”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 105, pp. 2513–2521, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04485-5>
- [11] V.S. Maiboroda *et al.*, “AISI 1045 steel flat surfaces machining using the magneto-abrasive method”, *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 7(1), pp. A1–A7, 2020. [https://doi.org/10.21272/jes.2020.7\(1\)](https://doi.org/10.21272/jes.2020.7(1))
- [12] V.S. Maiboroda *et al.*, “Magneto-abrasive machining of flat surfaces with permanent magnet heads”, *Technical Engineering*, Vol. 1(85), pp. 60–65, 2020. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-1\(85\)-60-65](https://doi.org/10.26642/ten-2020-1(85)-60-65)
- [13] V.S. Maiboroda *et al.*, “Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads 1. The influence of the type of magneto-abrasive powder on the effectiveness of the magneto-abrasive machining”, *Mechanics and Advanced Technologies*, Vol. 89, pp. 121–130, 2020. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.202696>
- [14] V.S. Maiboroda, *Fundamentals of creation and use of powder magneto-abrasive tool for finishing of shaped surfaces*, Dr.D., National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, 2001.

Оброблення плоских поверхонь магнітно-абразивним методом торцевими головками на постійних магнітах 3. Вплив типу робочих головок на ефективність магнітно-абразивного оброблення

Майборода Віктор Станіславович, Джулій Дмитро Юрійович, Зелінко Андрій Ігорович, Буріков Олексій Олегович

Анотація. Виконано дослідження процесу магнітно-абразивного оброблення (МАО) феромагнітних плоских поверхонь торцевими головками трьох типів. Визначено характер зміни величини магнітної індукції в зонах оброблення, досліджено вплив технологічних параметрів процесу оброблення, таких як швидкість подачі робочих головок, частоти їх обертання навколо власної осі, величини робочих зазорів на зміну параметрів мікронерівностей оброблюваних поверхонь – S_a , S_p , S_v , частотного розподілу висот мікронерівностей і величини опорної поверхні профілю. Показано, що рівень досягаємої після МАО шорсткості практично однаковий і не перевищує, при раціональних умовах процесу МАО, величини $S_a = 0,05–0,07$ мкм, $S_p = 0,2$ мкм і $S_v = 0,39$ мкм з тією лише різницею, що процес МАО головками типу “щітка-напівтор” реалізується з підвищеною продуктивністю особливо з точки зору зниження хвилястості і окремих елементів спадковості оброблення, яка визначається такими факторами, як глибина і величина подачі при фрезеруванні. Показана кінетика формування мікропрофілю поверхонь при різних технологічних умовах процесу МАО.

Ключові слова: Магнітно-абразивне оброблення, магнітні головки торцевого типу, постійні магніти, робочі поверхні, ефективність, шорсткість

Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads 3. The influence of the types of the working heads on the effectiveness of the magneto-abrasive machining

Victor Maiboroda, Dmytro Dzhulii, Andrii Zelinko, Alexey Burikov

Abstract. Investigations of the magneto-abrasive machining (MAM) process of ferromagnetic flat surfaces by three types of end heads were carried out. The nature of the change in the magnitude of the magnetic induction in the working zones was determined. The influence of technological parameters of the machining process was investigated, such as the feed rate of the working heads, the frequency of their rotation about their axis, the size of the working gaps on the change in the parameters of the microroughness of the machined surfaces – S_a , S_p , S_v , the frequency distribution of heights microroughness and size of the supporting surface of the profile. It was shown that the level of roughness achieved after MAM is practically the same and does not exceed, under rational conditions of the MAM process, the values $S_a = 0.05–0.07$ μm , $S_p = 0.2$ μm and $S_v = 0.39$ μm with the only difference that the MAM process by the heads of the “brush-half of torus” type are being realized with increased productivity, especially in terms of reducing waviness and individual elements of the heredity of machining, determined by such factors as depth and feed rate during milling. The kinetics of the formation of a microprofile of surfaces is shown under various technological conditions of the MAM process.

Keywords: Magneto-abrasive machining, end-type magnetic heads, permanent magnets, working surfaces, efficiency, roughness.