

В.С. Майборода, д.т.н., проф.**И.В. Слободянюк, к.т.н., доц.****Д.Ю. Джулий, к.т.н., доц.***КПИ имени Игора Сикорского***А.И. Зелинко, магистр***Магдебургский университет имени Отто-фон-Герике*

Магнитно-абразивная обработка плоских поверхностей головками на постоянных магнитах

Исследованы особенности магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей ферромагнитных деталей торцевыми магнитными головками, изготовленными с использованием высокомоощных постоянных неодимовых магнитов. Изучено распределение магнитного поля вблизи рабочей поверхности магнитных головок типа щетка и полупор. Проведен цикл исследований по влиянию формы рабочих поверхностей магнитных головок в виде: кольцевого выступа на периферии головки, с радиальными лучевыми выступами и группой радиально расположенных пирамидальных выступов высотой 2–3 мм на обеспечиваемую в результате магнитно-абразивной обработки шероховатость плоских ферромагнитных деталей. Показана возможность получения в результате магнитно-абразивной обработки торцевыми магнитными головками шероховатости поверхности с $Ra < 0,05$ мкм при исходной шероховатости на уровне $Ra = 1–1,25$ мкм. Установлено, что эффективный процесс магнитно-абразивной обработки будет реализовываться в том случае, когда отношение изменения шероховатости, достигаемое в процессе обработки к исходной шероховатости будет превышать величину 0,85. Проанализировано влияние величины рабочего зазора, высоты формирующегося магнитно-абразивного инструмента и величины магнитной индукции в зонах обработки на эффективность процесса. Рекомендовано использование магнитных головок типа щетка, у которых на рабочие торцевые поверхности нанесены выступы в виде группы пирамид высотой 2–3 мм. Для головок подобного типа эффективность обработки соответствует величине 0,89–0,91.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка; плоские поверхности; эффективность; шероховатость; магнитные головки торцевого типа; неодимовые магниты.

Актуальность темы. При обеспечении финишной обработки как плоских поверхностей, так и поверхностей с малой кривизной важной задачей является разработка методов и устройств, которые достаточно мобильны и могут быть использованы на универсальном металлорежущем оборудовании. Одним из перспективных направлений при решении данной проблемы является применение метода магнитно-абразивной обработки (МАО), у которого для формирования магнитно-абразивного инструмента (МАИ) применяют сменные магнитные головки, изготовленные с использованием постоянных магнитов с высокой степенью намагниченности.

Анализ последних исследований и публикаций, на которые ссылается автор. Для обеспечения эффективного процесса МАО необходимо выполнение трех основных условий [1, 2]:

- обеспечение равномерного прижима элементов МАИ к обрабатываемым поверхностям;
- наличие достаточной и равномерно распределенной относительно обрабатываемых поверхностей тангенциальной составляющей скорости относительного движения элементов МАИ и обрабатываемой поверхности;
- способность МАИ к постоянному перемешиванию, восстановлению рабочей формы, нивелированию процессов, приводящих к выбрасыванию и вытеснению порошка из зон активной обработки.

При МАО плоских поверхностей реализация выполнения первого условия будет обеспечиваться за счет использования энергии магнитного поля магнитов, особенностей создания заданного градиента магнитной индукции в зоне обработки между обрабатываемой поверхностью и рабочей поверхностью магнитной головки, величиной зазора.

Реализация второго и третьего условий может быть связана с характером движения головки, видом градиента магнитной индукции в зоне обработки, конструкцией и формой рабочих поверхностей корпуса головки, которые принимают непосредственное участие в формировании МАИ и способствуют активному перемещению и перемешиванию частиц МАИ относительно обрабатываемых поверхностей [3–5].

Исследования, выполненные в данной области показали перспективность применения постоянных магнитов для финишной обработки методом МАО [6–9]. Общим недостатком известных работ является отсутствие конкретной информации о технологическом процессе и рекомендаций по использованию предлагаемых схем и конструкций.

Целью работы было разработать реальные конструкции магнитных головок торцевого типа и выполнить оценку их работоспособности.

В качестве базовых элементов рабочих головок рассматривали возможности использования высокомоощных неодимовых магнитов в виде цилиндра диаметром 40 мм и высотой 20 мм и двух кольцевых цилиндров с аналогичной высотой, вставленных друг в друга так, чтобы они были ориентированы к рабочей поверхности противоположными полюсами. Характерный вид расположения магнитно-абразивного порошка на рабочей поверхности головок торцевого типа представлен на рисунке 1. Условно головки были названы по внешнему виду формируемого на рабочей поверхности МАИ как полотор и щетка.

На первом этапе исследовано изменение величины магнитной индукции – B в зависимости от расстояния от рабочей поверхности головок. Полученные результаты по максимальной величине магнитной индукции приведены на рисунке 2. Показано, что с увеличением расстояния от рабочей поверхности величина магнитной индукции снижается по зависимостям близким к линейным. Причем скорость уменьшения величины B для головки типа щетка составляет 0,0228 Тл/мм, а для полотора – 0,0335 Тл/мм. Подобная разница в характере снижения магнитной индукции связана как со степенью намагниченности магнитов, так и с особенностями распределения силовых магнитных линий вблизи торцевой поверхности головок.

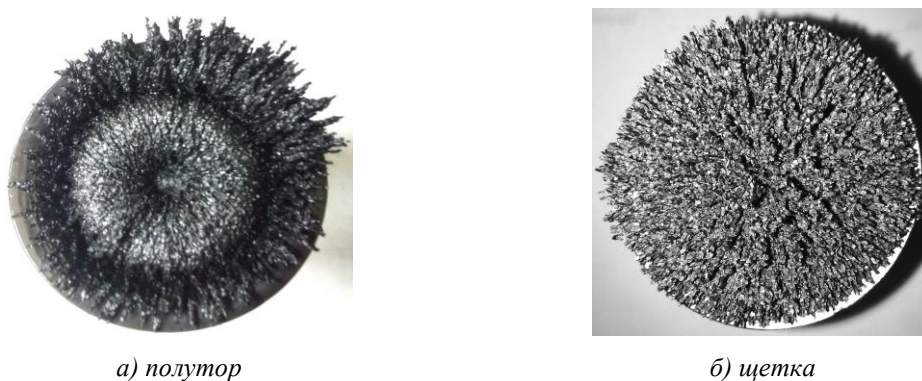


Рис. 1. Расположение порошка на рабочих поверхностях рабочих головок после цикла МАО ферромагнитных деталей

На втором этапе проведены испытания головок с гладкой рабочей поверхностью с МАИ вида полотор и щетка при рабочих зазорах (высоте МАИ) 2 и 3 мм. Оценка эффективности процесса МАО выполняли по величине абсолютного изменения параметра шероховатости – $\Delta Ra = Ra_{исх} - Ra_{кон}$ и относительного изменения параметра шероховатости – $\Delta Ra/Ra_{исх}$.

Испытания рабочих головок выполняли при частоте вращения головок 900 об/мин, величине подачи 10 мм/мин. В качестве магнитно-абразивного порошка использовали Ферромап с размером частиц 630/400 мкм. В качестве обрабатываемого материала использовали предварительно фрезерованную торцевой фрезой деталь из стали 45 с $Ra = 0,9-1$ мкм.

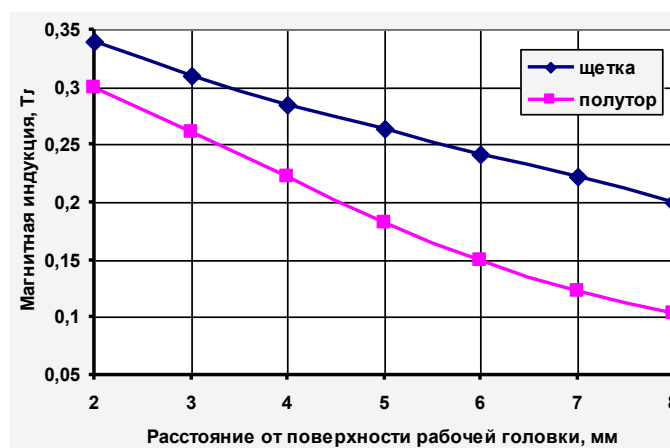


Рис. 2. Изменение величины магнитной индукции в зависимости от расстояния от рабочей поверхности головок

Отметим, что данная шероховатость измерялась в направлении, совпадающем с направлением подачи при фрезеровании. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Изменение параметра Ra после MAO головками с МАИ различной высоты и разной магнитной индукцией в рабочем зазоре

Тип МАИ	Высота МАИ, мм	Магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл	$Ra_{исх}$, мкм	ΔRa , мкм	$\Delta Ra/Ra_{исх}$
Полутор	3	0,26	0,95	0,17	0,18
	2	0,3	0,9	0,16	0,18
Щетка	3	0,305	1	0	0
	2	0,34	0,99	0,02	0,02

Наблюдения за особенностями поведения МАИ при реальной обработке показали, что не выполняется второе основное условие для обеспечения эффективного MAO – отсутствует достаточное относительное перемещение МАИ и обрабатываемой поверхности. Зафиксировано преимущественное перемещение МАИ по поверхности головок, что приводило в основном к обработке ее рабочей поверхности и нагреву. Данные эффекты являются недопустимыми. Для обеспечения выполнения второго основного условия эффективного MAO предложено использовать различные формы рабочей поверхности магнитных головок – с кольцевым выступом на периферии головки, с радиальными лучевыми выступами и группой радиально расположенных пирамидальных выступов высотой 2–3 мм (рис. 2).

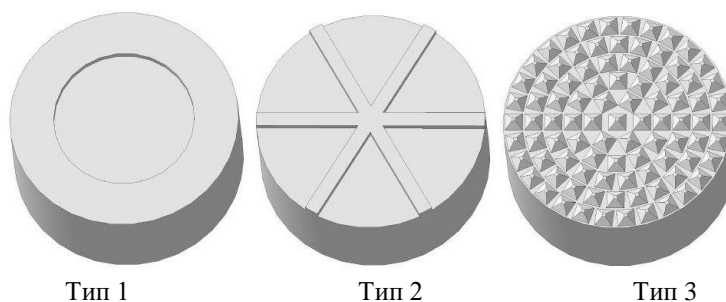


Рис. 3. Конструкции рабочих поверхностей магнитных головок

Результаты экспериментальных испытаний представлены в таблице 2. Показано, что уже при наличии кольцевого выступа на периферии рабочей поверхности головки (тип 1) проявляется резкий рост эффективности процесса MAO за счет ограничения зоны активной обработки и создания заклинивающих зон при формировании МАИ. Причем для головки, в которой используется два кольцевых магнита (полутор), эффект заклинивания более ярко выражен. Для головки с МАИ в виде щетки наилучшие результаты получены при рабочем зазоре 4 мм. Увеличение и уменьшение рабочего зазора приводит к некоторому снижению эффективности MAO. Использование рабочих поверхностей второго и третьего типов на головках, которые формируют МАИ вида полутор, привело к негативным результатам, так как сформированные выступы привели к нарушению сплошности, сформированному по кольцу МАИ между противоположными полюсами магнитов, и невыполнению третьего условия.

Таблица 2

Изменение параметра Ra после MAO различными магнитными головками

Тип рабочей поверхности головок	Тип МАИ	Высота МАИ, мм	$Ra_{исх}$, мкм	ΔRa , мкм	$\Delta Ra/Ra_{исх}$
1	Полутор	4	0,89	0,75	0,84
		3	0,95	0,85	0,89
	Щетка	4	0,83	0,74	0,89
		3	0,72	0,57	0,79
2	Полутор	4	1,24	0,62	0,5
	Щетка	4	1,29	1,1	0,85
3	Полутор	4	0,67	0,19	0,28
			1,57	1,42	0,9
	Щетка	4	0,77	0,7	0,91

Полученные результаты показали, что перспективным направлением в создании конструкций головок с МАИ вида щетка будут те, у которых на рабочую поверхность нанесены выступы различной формы. При этом такие головки будут эффективны в случае когда $\Delta Ra/Ra_{исх} > 0,85$. Нанесенные на рабочую поверхность выступы обеспечивают выполнение второго и третьего условия для обеспечения эффективного процесса MAO.

На третьем этапе исследований анализировали влияние величины магнитной индукции в рабочем зазоре и высоты МАИ на эффективность MAO. Для этого в качестве базовой конструкции головки был выбран полунот с рабочей поверхностью первого типа. Высота кольцевого выступа, расположенного на периферии головки, варьировалась в диапазоне от 0 до 6 мм, величина зазора между обрабатываемой поверхностью и поверхностью выступа составляла 1, 2 и 3 мм, что позволило менять величину рабочего зазора и высоту МАИ от 2 до 9 мм и соответственно величину магнитной индукции в зоне обработки от 0,1 до 0,3 Тл. Дополнительно контролировали величину Ra в перпендикулярном направлении – направлении перпендикулярном вектору подачи торцевой фрезы.

Характер изменения величины $\Delta Ra/Ra_{исх}$ в зависимости от величины магнитной индукции в зоне обработки представлен на рисунке 4.

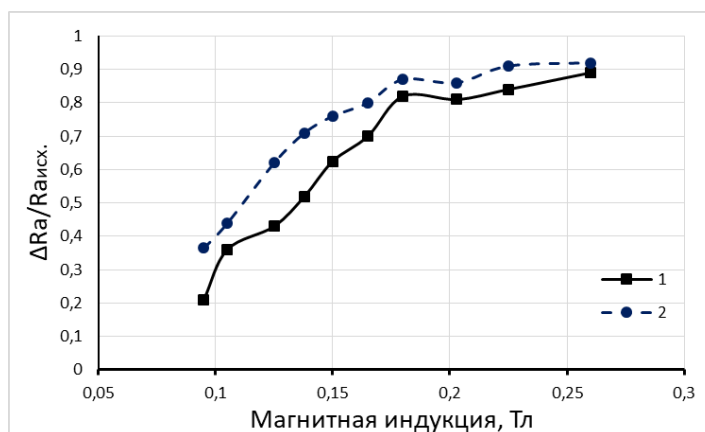


Рис. 4. Изменение относительной шероховатости – $\Delta Ra/Ra_{исх}$ в зависимости от величины магнитной индукции в рабочих зазорах. 1 – параметр $\Delta Ra/Ra_{исх}$, полученный при измерениях в направлении, совпадающем с подачей при фрезеровании, 2 – параметр $\Delta Ra/Ra_{исх}$, полученный при измерениях в направлении перпендикулярном вектору подачи торцевой фрезы

Анализ полученных результатов показал, что при обработке плоских поверхностей из ферромагнитных материалов величина магнитной индукции в зонах обработки должна быть не менее 0,18 Тл в рабочих зазорах, свободных от порошка. При этом целесообразно использование рабочих зазоров менее 5 мм. Следует отметить, что нижняя граница величины рабочего зазора будет определяться размером частиц магнитно-абразивных порошков. Так для порошков, которые были использованы при проведении выше описанных исследований, эта граница составляет 2–2,5 мм. Меньшие зазоры при MAO приводят к ухудшению шероховатости поверхности и ее шаржированию (рис. 5). Данная величина связана с разметом квазистабильных представительских объемов, из которых формируется МАИ [2]. При использовании более мелких порошковых материалов величина рабочего зазора может уменьшаться до 1–1,5 мм.

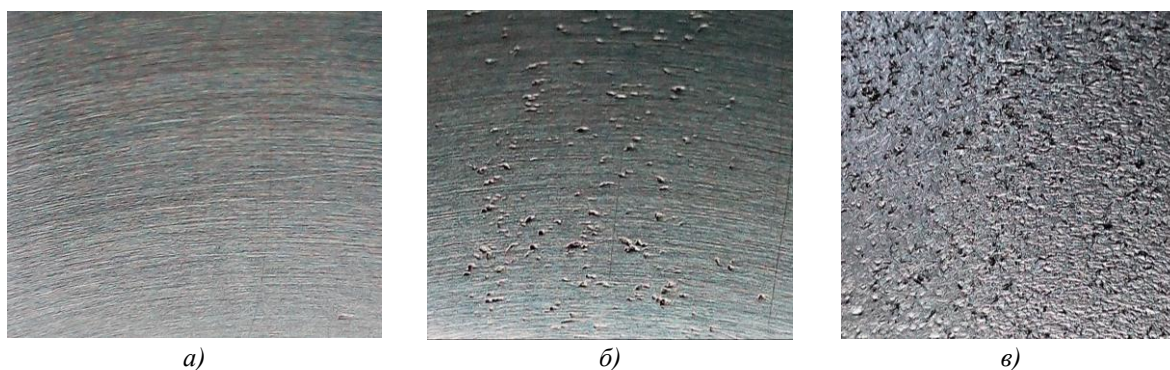


Рис. 5. Фотографии поверхностей образцов из стали 45 после MAO (x4) порошком Ферромап (630/400 мкм) с рабочим зазором: а) – 3,5 мм, б) – 2,5 мм, в) – 1,5 мм

На четвертом этапе исследований анализировали влияние второго и третьего типов рабочих головок с МАИ высотой 4 и 5 мм в виде щетки при MAO образцов из стали 45. Полученные результаты сравнивали с обработкой головками, формирующими МАИ в виде полутора. Экспериментальные данные представлены в таблице 3.

Анализ полученных результатов показал, что выступы, нанесенные на рабочую поверхность магнитных головок, что формируют МАИ вида щетка, обеспечивают не только выполнение второго и третьего условий эффективного процесса MAO, а и позволяют после фрезерования и последующего MAO формировать шероховатость поверхности на уровне 0,06–0,15 мкм при исходной шероховатости $Ra = 0,7–1,6$ мкм. Причем чем ниже исходная шероховатость, тем меньше формируется шероховатость после MAO. В случае, когда исходная шероховатость не превышала $Ra = 0,7$ мкм, в процессе MAO практически полностью удалялась волнистость поверхности, формируемая на стадии торцевого фрезерования.

Таблица 3

Изменение параметра Ra после MAO различными магнитными головками

Тип рабочей поверхности головок	Тип МАИ	Высота МАИ, мм	$Ra_{исх}$, мкм	ΔRa , мкм	$\Delta Ra/Ra_{исх}$
2	Полутор	5	0,92	0,34	0,37
		4	1,24	0,62	0,5
	Щетка	5	1,29	1,1	0,85
		4	1,29	1,1	0,85
3	Полутор	5	0,77	0,28	0,36
		4	0,67	0,18	0,27
	Щетка	5	1,55	1,4	0,9
		4	1,57	1,42	0,9

Показано, что применение магнитных головок третьего типа является предпочтительным, так как обеспечивает наивысшую эффективность, которая проявляется в значениях $\Delta Ra/Ra_{исх} \geq 0,9$. Полученные результаты практически идентичны как при анализе изменения параметра Ra полученных при измерениях в направлении, совпадающем с подачей при фрезеровании, так и при измерениях в перпендикулярном направлении вектору подачи торцевой фрезы при подготовке поверхностей для MAO.

Важно отметить, что необходимо проведение дополнительного цикла исследований по влиянию как формы выступов, так и их плотности расположения на рабочей поверхности магнитных головок на эффективность процесса MAO.

Дополнительно было исследовано влияние частоты вращения головок в диапазоне 510–1400 об/мин с рабочей поверхностью третьего типа. Установлено, что в указанном диапазоне частот вращения головок имеет место незначительное увеличение величины $\Delta Ra/Ra_{исх}$ от 0,9 до 0,94 с возрастанием частоты вращения. При этом устойчиво обеспечивается шероховатость обработанных методом MAO ферромагнитных плоских поверхностей на уровне $Ra = 0,03–0,07$ мкм.

Выводы. Выполненные исследования различных магнитных головок торцевого типа на высокомоощных постоянных магнитах показали, что на рабочей торцевой поверхности головок целесообразно нанесение выступов различной формы, которые обеспечивают проведение MAO ферромагнитных плоских поверхностей с высокой эффективностью, которую характеризовали величиной относительного изменения параметра шероховатости – $\Delta Ra/Ra_{исх} > 0,85$. Наилучшие результаты получены при величине магнитных зазоров меньше 5 мм на торцевых головках, которые в процессе МАИ формируют магнитно-абразивный инструмент в виде щетки с рабочими поверхностями, на которые нанесены выступы в виде группы пирамид. Показано, что при исходной шероховатости поверхности после торцевого фрезерования с $Ra = 0,7–1,5$ мкм возможно получение шероховатости поверхности после MAO с $Ra < 0,05$ мкм с отсутствием волнистости, формируемой на этапе фрезерования. Установлено, что при частоте вращения торцевых магнитных головок в диапазоне 510–1400 об/мин имеет место незначительный рост величины $\Delta Ra/Ra_{исх}$ от 0,9 до 0,94 с возрастанием частоты вращения, а шероховатость обработанных поверхностей составляет $Ra = 0,03–0,07$ мкм.

Список использованной литературы:

1. Майборода В.С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту, сформованого з двох фракційних сумішей порошоків при магнітно-абразивній обробці у великих магнітних щілинах / В.С. Майборода // Технологічні системи. – 2007. – № 1 (37). – С. 40–55.
2. Майборода В.С. Магнітно-абразивная обработка деталей сложной формы / В.С. Майборода, И.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулий. – Житомир : ПП «Рута», 2017. – 272 с.
3. Хомич Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий / Н.С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 218 с.

4. *Лепший А.П.* Магнитно-абразивная обработка крупногабаритных плоских поверхностей : дис. ... канд. тех. наук : 05.03.01, 05.02.08 / *А.П. Лепший*. – Минск, 1992. – 135 с.
5. Вплив режимів магнітно-абразивного оброблення на шорсткість плоских поверхонь / *В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій, І.В. Слободянюк, Ю.В. Коцун* // Тези доповідей VIII міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів і систем». – Чернівці, 2018. – С. 139–141.
6. *Барон Ю.М.* Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / *Ю.М. Барон*. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 176 с.
7. *Harsh K.* Magnetorheological nano-finishing of diamagnetic material using permanent magnets tool / *K.Harsh, G.Vishwas* // *Precision Engineering*. – 2018. – № 51. – С. 30–39.
8. *Jain V.K.* Chemo-mechanical magneto-rheological finishing (CMMRF) of silicon for microelectronics applications / *V.K. Jain, P.Ranjan* // *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. – 2019. – № 59. – С. 323–238.
9. *Wang Y.Q.* Magnetorheological polishing using a permanent magnetic yoke withstraight air gap for ultra-smooth surface planarization / *Y.Q. Wang, S.H. Yin* // *Precision Engineering*. – 2014. – № 13. – С. 1–9.
10. *Майборода В.С.* Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь : дис. ... д-ра техн. наук / *В.С. Майборода*. – Київ, 2001. – 404 с.

References:

1. Majboroda, V.S. (2007), «Doslidzhennja vlastyvostrych magnitno-abrazyvnogo instrumentu, sformovanogo z dvoh frakcyjnyh sumishej poroshkiv pry magnitno-abrazyvnyj obrobci u velykyh magnitnyh shhilynah», *Tehnologichni systemy*, No. 1 (37), pp. 40–55
2. Maiboroda, V.S., Slobodyanyuk, I.V. and Dzhulij, D.Yu. (2017), *Magnitno-abrazivnaya obrabotka detalei slozhnoi formy*, Ruta, Zhitomir, 272 p.
3. Khomich, N.S. (2006), *Magnitno-abrazivnaya obrabotka izdelii*, BNTU, Minsk, 218 p.
4. Lepshii, A.P. (1992), «Magnitno-abrazivnaya obrabotka krupnogabaritnykh ploskikh poverkhnostei», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.03.01, 05.02.08, Minsk, 135 p.
5. Majboroda, V.S., Dzhulij, D.Ju., Slobodjanjuk, I.V. and Kocun, Ju.V. (2018), «Vplyv rezhymiv magnitno-abrazyvnogo obroblynnja na shorstkist' ploskyh poverhon'», *Tezy dopovidej VIII mizhnarodnoi' naukovopraktychnoi' konferencii' «Kompleksne zabezpechennja yakosti tehnologichnyh procesiv i system»*, Chernigiv, pp. 139–141.
6. Baron, Yu.M. (1986), *Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdelii i rezhushchikh instrumentov*, Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, L., 176 p.
7. Harsh, K. and Vishwas, G. (2018), «Magnetorheological nano-finishing of diamagnetic material using permanent magnets tool», *Precision Engineering*, No. 51, pp. 30–39.
8. Jain, V.K. and Ranjan, P. (2019), «Chemo-mechanical magneto-rheological finishing (CMMRF) of silicon for microelectronics applications», *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, No. 59, pp. 323–238.
9. Wang, Y.Q. and Yin, S.H. (2014), «Magnetorheological polishing using a permanent magnetic yoke withstraight air gap for ultra-smooth surface planarization», *Precision Engineering*, No. 13, pp. 1–9.
10. Majboroda, V.S. (2001), «Osnovy stvorennya i vykorystannja poroshkovogo magnitno-abrazyvnogo instrumentu dlja finishnoi' obrobky fasonnyh poverhon'», D.Sc. Thesis of dissertation, Kyi'v, 404 p.

Майборода Виктор Станиславович – доктор технических наук, профессор Киевского политехнического института имени Игоря Сикорского.

Научные интересы:

- физика процессов резания;
- финишная обработка;
- реология порошковых сред в магнитном поле.

Слободянюк Иванна Валентиновна – кандидат технических наук, доцент Киевского политехнического института имени Игоря Сикорского.

Научные интересы:

- магнитно-абразивная обработка;
- реология порошковых сред в магнитном поле.

Джулий Дмитрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент Киевского политехнического института имени Игоря Сикорского.

Научные интересы:

- магнитно-абразивная обработка;
- упрочнение твердосплавного инструмента.

Зелинко Андрей Игоревич – магистр Магдебургского университета имени Отто-фон-Герике.

Научные интересы:

- технология машиностроения;
- магнитно-абразивная обработка плоских деталей

Статья поступила в редакцию 24.02.2020.