

УДК 621.941.02, 621.941.01

# Совершенствование технологии финишной абразивной обработки в магнитном поле резьбовой поверхности замкового соединения из конструкционной легированной стали для буровых штанг



**В. В. Максаров,**  
декан механико-  
машиностроительного  
факультета<sup>1</sup>, профессор,  
докт. техн. наук,  
эл. почта: maks78.54@mail.ru



**Р. А. Каренина,**  
аспирант кафедры  
машиностроения<sup>1</sup>,  
эл. почта: radmila8609@mail.ru



**М. С. Синюков,**  
магистрант кафедры  
машиностроения<sup>1</sup>,  
эл. почта: sms-0305@yandex.ru

Представлены особенности работы замкового соединения буровой штанги, и проблемы, возникающие при формировании микрогеометрии резьбы. Предложен метод магнитно-абразивного полирования наружной и внутренней резьбовой поверхности замкового соединения. Рассмотрен способ определения магнитных сил в рабочем пространстве устройства для магнитно-абразивной обработки. Показано применение программной среды ANSYS Maxwell для расчета величины магнитной индукции в межполюсном пространстве. Приведен анализ распределения магнитных сил в межполюсном пространстве при различных модификациях полюсных магнитов, позволяющий определить наиболее эффективный конструктив магнитного наконечника. Полученные результаты позволяют определить условия технологического обеспечения равномерного поверхностного слоя резьбовой поверхности замкового соединения буровой штанги.

**Ключевые слова:** магнитно-абразивное полирование, магнитный наконечник, распределение магнитных сил, моделирование, резьбовое соединение, шероховатость, усталостная прочность.

**DOI:** 10.17580/chm.2024.09.10

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

## Введение

При эксплуатации нефтяных и газовых скважин замковые соединения буровых труб (**рис. 1**) считают одними из наиболее важных компонентов буровой колонны, обеспечивающих достижение требуемой глубины бурения, ввиду универсальности, простоты, надежности и возможности быстрого монтажа [1, 2]. Буровые замки изготавливают из конструкционной легированной стали 40Х или 40ХН, обладающей высокими прочностными показателями и коррозионной стойкостью.

Ввиду развития обрабатываемой отрасли промышленности остро востребована технология сверхточной обработки компонентов сложной формы с высоким качеством

поверхности и высокой эффективностью [3–5]. Механическая обработка сопровождается погрешностями и разбросом размеров, допусков и шероховатостей [6–8]. Проблемы высокой точности обработки особенно актуальны для конических резьбовых соединений бурового оборудования, работающих в условиях агрессивных коррозионных жидкостей, высокого давления и температуры, хаотичного нагружения и крутящих моментов [9–11]. Известно, что распределение напряжений по соединению неравномерно [12], в результате чего часто возникают разрушения по телу резьбы, приводящие к обрыву колонны [13, 14].

Одним из финишных нетрадиционных методов обработки, который может обеспечить снижение величины



**Рис. 1.** Замковое соединение буровых труб: а — образцы; б — при эксплуатации

шероховатости поверхности и улучшение износостойкости, а также поверхностных свойств за счет взаимодействия и относительного перемещения инструмента и обрабатываемой детали, является процесс магнитно-абразивного полирования (МАП) [15–17].

Важной составляющей МАП являются полюсные наконечники как часть магнитопровода, непосредственно участвующая в улучшении качества обработанной поверхности [18–20]. Такие параметры, как наличие вращения, особенности геометрии и сплошность сечения, существенно влияют на результаты процесса [21–23]. Например, геометрия рабочей поверхности магнитного наконечника формирует характеристики рабочего пространства, что, в свою очередь, определяет параметры работы ферромагнитной абразивной щетки [24–26].

Еще одно назначение магнитных наконечников заключается в расширении функциональных возможностей магнитно-абразивного устройства. Наличие вариантов исполнения этих элементов позволяет обрабатывать изделия различных размеров и форм, что делает оборудование более универсальным [27, 28].

Общепринято выделять два основных типа магнитных наконечников: неподвижные, которые неразрывно связаны с магнитопроводом электромагнитной системы, и подвижные [29, 30]. Неподвижные характеризуются жесткой привязкой к магнитопроводу. Главным требованием при их использовании является минимизирование магнитных потерь, которые могут возникнуть из-за разрывов в сечении магнитного провода [31, 32]. Подвижные могут перемещаться, что позволяет более гибко настраивать рабочую зону и адаптировать ее под различные изделия и задачи обработки.

Следует отметить, что правильный выбор профиля полюсных наконечников магнитопровода является решающим в обеспечении эффективной работы магнитно-абразивного оборудования и достижении высоких результатов в области обработки материалов [33, 34].

Целью данного исследования являются совершенствование технологии МАП замковой резьбы буровой штанги, посредством подбора типа полюсных наконечников, позволяющих расширить технологические возможности процесса финишной обработки, и оценка распределения магнитного поля в межполюсном пространстве.

### Материал и методика исследования

Для изучения зависимостей распространения магнитного потока в рабочем пространстве рассмотрены образцы с замковой конической резьбой (см. рис. 1, а) и подготовлена модель магнитно-абразивного устройства (рис. 2, а) со сменными полюсными наконечниками (см. рис. 2, б–д).

Характеристики магнитного поля изучали с помощью программной среды ANSYS Maxwell, предназначенной для комплексного моделирования электромагнитного поля при анализе трехмерной системы.

### Результаты исследования и их обсуждение

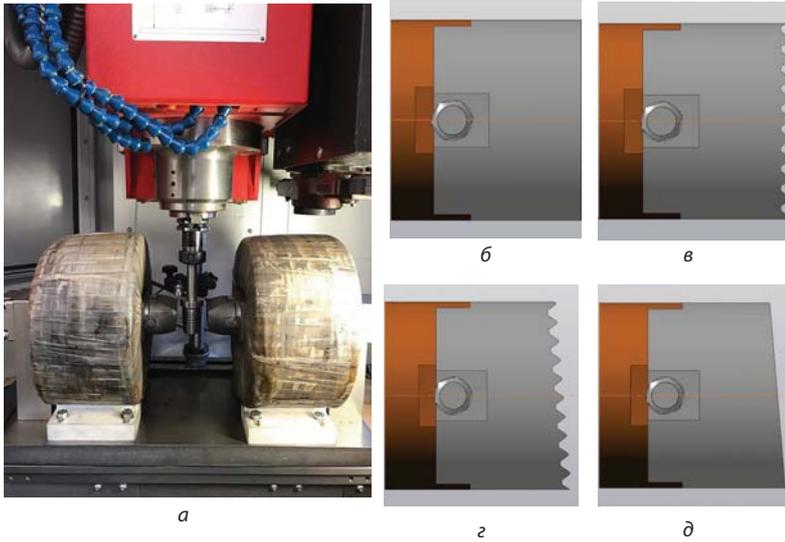
В процессе исследования получена картина магнитного поля в рабочем зазоре магнитно-абразивного устройства в зависимости от типа полюсного наконечника и график составляющей магнитной индукции в зависимости от местоположения в межполюсном пространстве согласно контуру (рис. 3).

Проведено моделирование при магнитных наконечниках, поверхность которых копирует профиль обрабатываемой резьбы (рис. 4, а, б). В результате моделирования определено, что в межполюсном зазоре для рис. 4, а распределение магнитной индукции  $B$  неравномерно, а для рис. 4, б — равномерно. Однако применение данного типа магнитных наконечников может привести к удорожанию процесса МАП ввиду высокой трудоемкости изготовления профиля.

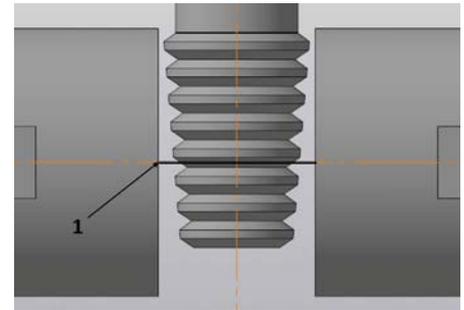
Выполненное моделирование МАП при прямом и наклонном магнитном наконечнике, имеющим плоскую поверхность (см. рис. 4, в, г), показало, что соблюдение постоянного рабочего зазора положительно влияет на распределение магнитной индукции (см. рис. 4, г).

В результате проведенного моделирования получен график распределения магнитной индукции  $B$  вдоль контура межполюсного пространства для устройства, полюсные наконечники которого имеют плоскую наклонную поверхность (рис. 5, а).

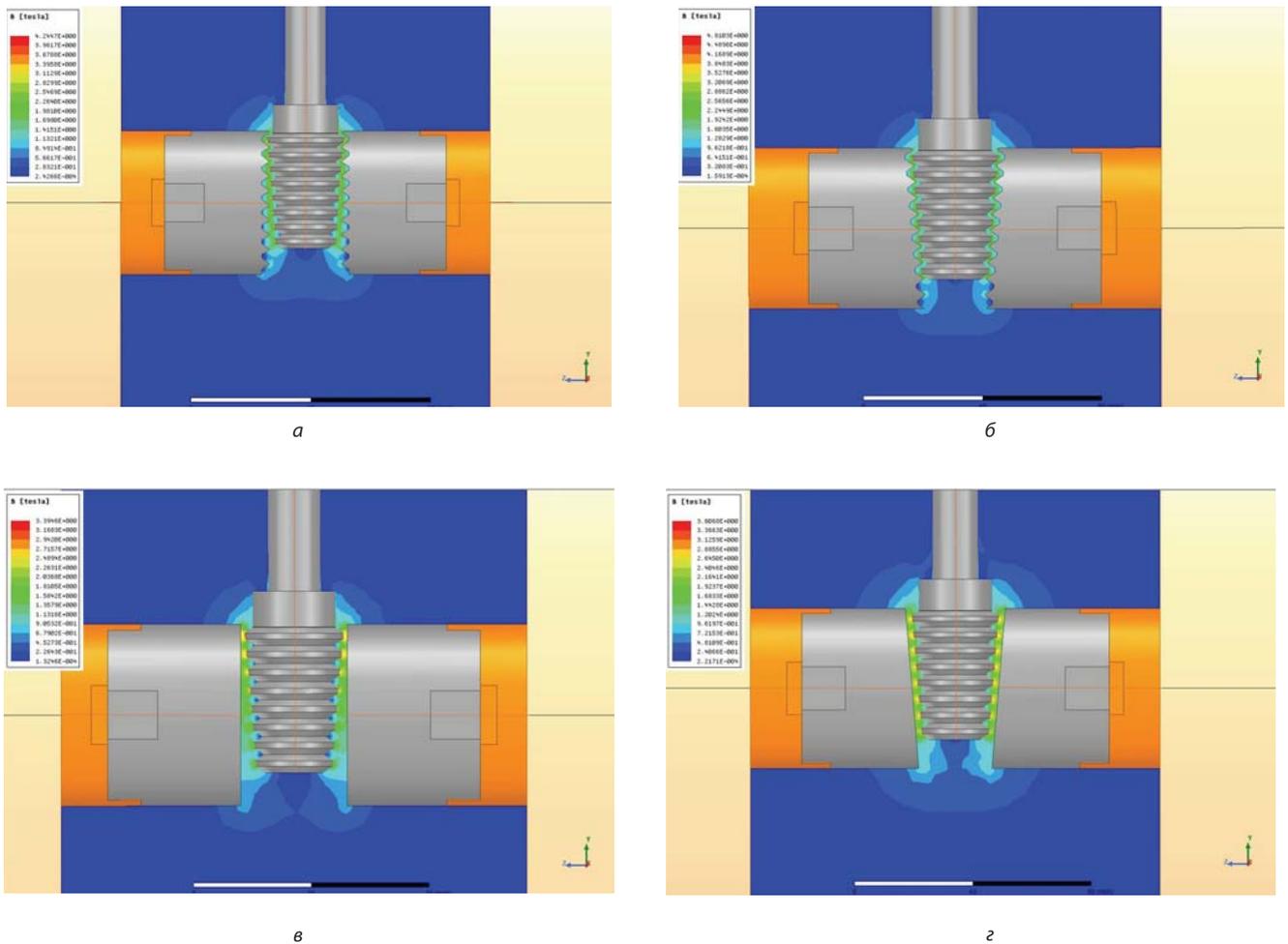
Согласно графику на рис. 5, магнитная индукция распределяется равномерно в диапазоне 10–25 мм межполюсного пространства и принимает значение, равное 2,6–2,7 Тл,



**Рис. 2.** Устройство для МАП (а) и полюсной наконечник: б — прямой; в — прямой, копирующий профиль резьбы; з — наклонный, копирующий профиль резьбы; д — наклонный



**Рис. 3.** Межполюсное пространство устройства: 1 — контур для построения графика магнитной индукции



**Рис. 4.** Картина магнитного поля при обработке наружной резьбы с полюсным наконечником, копирующим профиль резьбы и имеющим прямую (а), наклонную (б) поверхности; с плоским полюсным наконечником, имеющим поверхности прямую (в) и наклонную (з)

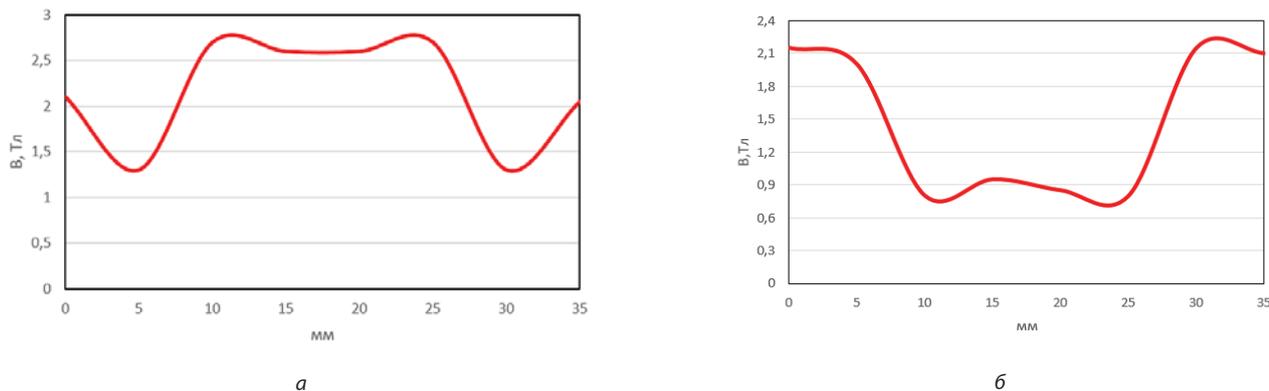


Рис. 5. Распределение магнитной индукции вдоль контура межполюсного пространства при обработке наружной (а) и внутренней (б) резьбовой поверхности

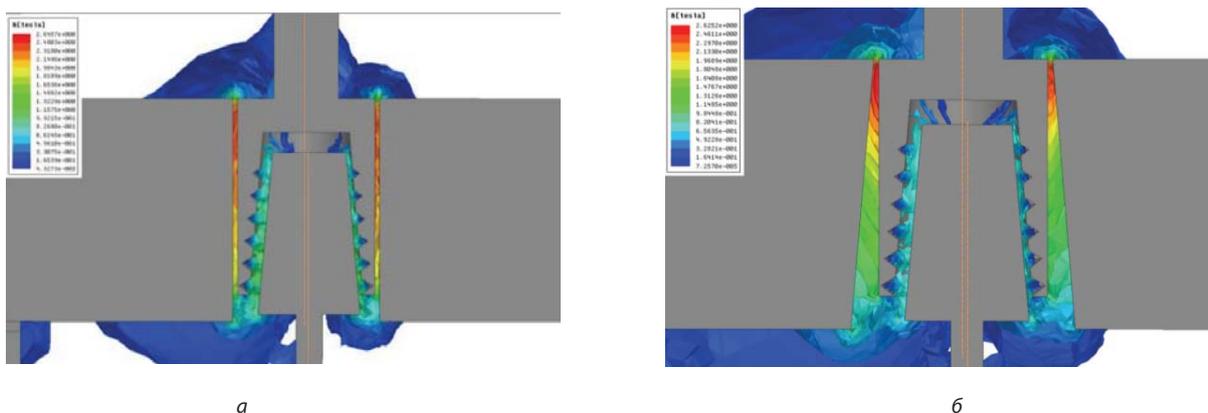


Рис. 6. Картина магнитного поля при обработке образца с внутренней резьбой с плоским полюсным наконечником, имеющим прямую (а) и наклонную (б) поверхности с установленными конусными наконечниками

а в диапазонах в районах 5 мм и 30 мм в местах расположения впадины резьбы резко падает до 1,3–1,4 Тл. Это свидетельствует о том, что для обеспечения равномерной обработки выступа и впадины резьбы необходимо подобрать определенные режимные параметры МАП.

В результате анализа данных моделирования МАП образца с наружной резьбовой поверхностью принято решение для изучения образца с внутренней резьбовой поверхностью использовать только прямые и наклонные плоские полюсные наконечники.

Ввиду того, что внутри обрабатываемого образца отсутствует постоянное и однородное магнитное поле и выполнить магнитно-абразивную обработку внутренней резьбы невозможно, принято решение во внутреннем пространстве образца установить конусный наконечник со смещением относительно собственной оси и оси заготовки (рис. 6, а, б) [35]. По результатам моделирования для обработки внутренней резьбовой поверхности выбрали плоские прямые полюсные наконечники (см. рис. 6, а).

Получен график распределения магнитной индукции В вдоль контура межполюсного пространства для устройства, полюсные наконечники которого имеют плоскую наклонную поверхность, обеспечивая постоянный зазор до обрабатываемой поверхности (см. рис. 5, б).

Согласно графику на рис. 5, б, магнитная индукция распределяется равномерно в диапазоне 10–25 мм межполюсного пространства и принимает значение, равное 0,85–0,95 Тл, а в диапазонах в районах 5 мм и 30 мм в местах расположения впадины резьбы резко падает до 0,75–0,80 Тл. Это свидетельствует о том, что для обеспечения равномерной обработки выступа и впадины резьбы необходимо подобрать определенные режимные параметры магнитно-абразивной обработки с учетом помещенного во внутреннее пространство конусного наконечника.

Для осуществления предлагаемых способов обработки провели эксперименты по магнитно-абразивному воздействию на наружную и внутреннюю резьбовые поверхности подготовленных образцов. При этом обработку образцов с наружной резьбой выполняли с вращением и одновременной синхронизацией поступательного и осцилляционного движения наконечников, установленных под углом, с поступательным движением заготовки. Образцы с внутренней резьбой обрабатывали с вращающимися наконечниками, установленными параллельно оси заготовки, и с помещенным во внутреннее пространство образца конусным наконечником, вращению которому задают с эксцентриситетом.

Для эксперимента подобрали следующие режимные параметры: магнитно-абразивный порошок Fe-TiC зернистостью

$\Delta = 160 \div 315$  мкм; магнитная индукция  $B = 0,6 \div 1,6$  Тл, длительность обработки  $t = 120 \div 240$  с (в зависимости от состояния обрабатываемой поверхности); подача  $S = 50$  мм/об.; частота вращения  $n = 360$   $n^{-1}$ ; величина рабочего зазора  $\delta = 1 \div 3,5$  мм.

В результате проведенных экспериментов с применением предлагаемого способа МАП для наружной и внутренней резьбовых поверхностей получены следующие значения шероховатости:

– для наружной  $Ra = 0,325$  мкм (на выступе),  $Ra = 0,326$  мкм (на впадине) (шероховатость необработанной поверхности составляла 0,770 и 0,773 мкм на выступе и впадине соответственно);

– для внутренней  $Ra = 0,323$  мкм (на выступе),  $Ra = 0,325$  мкм (на впадине) (шероховатость необработанной поверхности составляла 0,782 и 0,786 мкм на выступе и впадине соответственно).

Таким образом, подтверждено, что предлагаемые способы МАП позволяют сформировать равномерный поверхностный слой без дефектов на наружной и внутренней резьбовой поверхностях по всему ее профилю.

### Заключение

Технологическое обеспечение качества наружной и внутренней резьбовой поверхностях замкового соединения в процессе МАП достигается при выполнении следующих условий:

– постоянных значениях межполюсного зазора по всему профилю обрабатываемых поверхностей и магнитной индукции  $B$ ;

– установке вращающихся полюсных наконечников параллельно углу наклона резьбы, а их поступательное и осцилляционное движение синхронизировано с поступательным движением образца с наружной резьбовой поверхностью;

– введении дополнительного конусного наконечника, смещенного относительно собственной оси и оси образца при обработке внутренней резьбовой поверхности, вращение которого задано с эксцентриситетом.

Результаты моделирования в программе ANSYS Maxwell при плоских наклонных полюсных наконечниках, а также при дополнительно введенном конусном наконечнике во внутреннее пространство образца показали, что величина магнитной индукции в зоне обрабатываемой поверхности для наружной и внутренней резьбы составляет 1,5–1,6 и 0,85–0,95 Тл соответственно.

При установленных режимных параметрах МАП обеспечивается равномерный поверхностный слой с шероховатостью  $Ra = 0,770 \div 0,773$  мкм на наружной резьбовой поверхности и  $Ra = 0,782 \div 0,786$  мкм на внутренней. ЧМ

### Библиографический список

См. англ. блок

"Chernye metally", 2024, No. 9, pp. 65-70  
DOI: 10.17580/chm.2024.09.10

#### Improving the technology of finishing abrasive treatment in a magnetic field of the lock joint threaded surface of the structural alloy steel lock joint for drill rods

##### Information about authors

**V. V. Maksarov**, Dr. Eng., Prof., Dean of the Faculty of Mechanical Engineering<sup>1</sup>,  
e-mail: maks78.54@mail.ru;

**R. A. Karenina**, Postgraduate Student, Dept. of Mechanical Engineering<sup>1</sup>,  
e-mail: radmila8609@mail.ru;

**M. S. Sinyukov**, Master's Student, Dept. of Mechanical Engineering<sup>1</sup>,  
e-mail: sms-0305@yandex.ru

<sup>1</sup> Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

**Abstract:** The article presents the work features of the drill rod locking connection, and the problems that arise during the formation of the thread microgeometry. A method of magnetically abrasive polishing of the locking joint outer and inner threaded surfaces is proposed. A method for determining magnetic forces in the device working space for magnetic abrasive treatment is considered. The application of the ANSYS Maxwell software environment for calculating the magnitude of magnetic induction in the interpolar space is shown. The analysis of the magnetic forces distribution in the interpolar space with various modifications of pole magnets is presented, which allows us to determine the most effective design of the magnetic tip. The results obtained allow us to determine the conditions for technological provision of a uniform surface layer of the drill rod lock joint threaded surface.

**Key words:** magnetic abrasive polishing, magnetic tip, distribution of magnetic forces, modeling, threaded connection, roughness, fatigue strength.

**The studies were carried out with the involvement of the laboratory facilities of the Center for Collective Use of the Mining University.**

##### References

- Kopei V., Onysko O., Odosii Z., Pituley L. et al. Investigation of the influence of tapered thread profile accuracy on the mechanical stress, fatigue safety factor and contact pressure. *New Technologies, Development and Application IV*. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-75275-0\_21.
- Tepliyakova A. V., Azimov A. M., Alieva L., Zhukov I. A. Improvement of manufacturability and endurance of percussion drill assemblies: Review and analysis of engineering solutions. *MIAB*.

*Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022. Vol. 9. pp. 120–132. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-501-511.

- Akulovich L. M., Sergeev L. E., Lebedev V. Ya. Fundamentals of magnetic-abrasive treatment of metal surfaces. Minsk: BGATU, 2012. 316 p.
- Akulovich L. M., Sergeev L. E., Pokrovsky A. I., Senchurov E. V. Ferroabrasive powders for magnetic-abrasive treatment of metal surfaces. Minsk: BGATU, 2015. 284 p.
- Litvinenko V. S., Dvoynikov M. V. Methodology for determining the parameters of drilling mode for directional straight sections of well using screw downhole motors. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 241. pp. 105–112.
- Admakin M. A., Khalimonenko A. D., Zakharova V. P., Nguyen V. D. Machinability of cutting of low-magnetic high-manganese steels. *Chernye Metally*. 2023. No. 2. pp. 82–87.
- Gabov V. V., Zadkov D. A., Nguyen V. S., Khamitov M. S. et al. On the problem of improving the working tool of mining extracting machines. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2022. No. 6-2. pp. 205–222. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_205.
- Timofeev D. Yu., Khalimonenko A. D., Nacharova M. A. Preliminary local thermal impact as a surface quality assurance factor. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1031. pp. 125–131. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1031.125.
- Babayan S. A. Patterns of wear of tapered threads. *Azerbaydzshanskoe neftyanoe khozyaystvo*. 1972. No. 4. pp. 44–46.
- Baron Yu. M. Magnetic-abrasive and magnetic processing of articles and cutting tools. Leningrad: Mashinostroenie, 1986. 176 p.
- Timofeev E. G., Tepliyakova A. V., Zhukov I. A., Golikov N. S. Automated method for designing anvil blocks for impact machines based on the physical and mechanical properties of objects being destroyed. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2022. No. 12-2. pp. 257–269. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_257.
- Singh K., Jain V. K., Raghuram V. Experimental investigations into forces acting during a magnetic abrasive finishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006. Vol. 30. Iss. 7-8. pp. 652–662.
- Dvoynikov M. V., Sidorkin D. I., Yurtaev S. L., Grokhotov E. I. et al. Drilling of deep and superdeep wells for the purpose of searching and exploring new mineral deposits. *Zapiski Gornogo instituta*. 2022. Vol. 258. pp. 945–955. DOI: 10.31897/PMI.2022.55.
- Pesin M. V. Technological support and increase in durability of drill pipes based on modeling and control of parameters of hardening treatment of threads: thesis of inauguration of Dissertation ... of Doctor of Engineering Sciences. Perm, 2018. 34 p.
- Khomich N. S. Magnetic-abrasive processing of articles: monograph. Minsk: BGATU, 2006. 218 p.

16. Qian C., Fan Z., Tian Y., Liu Y. et al. A review on magnetic abrasive finishing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 112, Iss. 3-4. pp. 619–634. DOI: 10.1007/s00170-020-06363-x.
17. Vahdati M., Rasouli S. A. Study of magnetic abrasive finishing on freeform surface. *Transactions of the IMF*. 2016. Vol. 94, Iss. 6. pp. 294–302. DOI: 10.1080/00202967.2016.1232822.
18. Anjaneyulu K., Venkatesh G. Surface texture improvement of magnetic and non magnetic materials using magnetic abrasive finishing process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2021. Vol. 235, Iss. 19. pp. 4084–4096. DOI: 10.1177/0954406220970590.
19. Chawla Gagandeep, Kumar Vinod, Sharma Rishi. Neural simulation of surface generated during magnetic abrasive flow machining of hybrid Al/SiC/ B4C-MMCs. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 2021. Vol. 7, Iss. 153. DOI: 10.1007/s40735-021-00587-4.
20. Cheng Ken-Chuan, Chen Kuan-Yu, Tsui Hai-Ping, Wang A-Cheng. Characteristics of the polishing effects for the stainless tubes in magnetic finishing with gel abrasive. *Processes*. 2021. Vol. 9, Iss. 1561. DOI: 10.3390/pr9091561.
21. Yuewu Gao, Yugang Zhao, Guixiang Zhang, Fengshi Yin et al. Modeling of material removal in magnetic abrasive finishing process with spherical magnetic abrasive powder. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. Vol. 177. 105601. DOI: 10.1016/j.ijmecs.2020.105601.
22. Bolobov V. I., Popov G. G. Methodology for testing pipeline steels for resistance to grooving corrosion. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 252, Iss. 6. pp. 854–860. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.7.
23. Zou Y., Xie H., Zhang Y. Study on surface quality improvement of the plane magnetic abrasive finishing process. *Int J. Adv. Manuf. Technol*. 2020. Vol. 109. pp. 1825–1839. DOI: 10.1007/s00170-020-05759-z.
24. Kumar M., Kumar V., Kumar A., Yadav H. N. S. et al. CFD analysis of MR fluid applied for finishing of gear in MRAFF process. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. pp. 4677–4683. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.116.
25. Kumar V., Sharma R., Dhakar K., Singla Y. K. et al. Experimental evaluation of magnetic abrasive finishing process with diamond abrasive. *International Journal of Materials and Product Technology*. 2019. Vol. 58, Iss. 1. pp. 55–70. DOI: 10.1504/IJMPT.2019.096928.
26. Kumari C., Chak S. K. Experimental studies on material removal behavior in MRAH based finishing technique. *Materials and Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 36, Iss. 8. pp. 916–925. DOI: 10.1080/10426914.2021.1885699.
27. Bolobov V. I., Akhmerov E. V., Rakitin I. V. Influence of the rock type on the wear patterns of the excavator bucket tooth crown. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2022. No. 6 (2). pp. 189–204. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_189.
28. Kumar Vinod, Sharma Rishi. Neural simulation of surface generated during magnetic abrasive flow machining of hybrid Al/SiC/ B4C-MMCs. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 2021. Vol. 7, Iss. 153. DOI: 10.1007/s40735-021-00587-4.
29. Jain V., Kumar P., Behera P., Jayswal S. Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process. *Wear*. 2001. Vol. 250, Iss. 1-12. pp. 384–390. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00642-1.
30. Nagdeve L., Dhakar K., Kumar H. Development of novel finishing tool into magnetic abrasive finishing process of aluminum 6061. *Materials and Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 35, Iss. 10. pp. 1129–1134. DOI: 10.1080/10426914.2020.1767295.
31. Saxena V., Yadav P. S., Pali H. S. Effect of magnetic abrasive machining process parameters on internal surface finish. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 25, Iss. 4. pp. 842–847. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.11.051.
32. Singh P., Singh L., Singh S. Preparation, microstructure evaluation and performance analysis of diamond-iron bonded magnetic abrasive powder. *Powder Metallurgy Progress*. 2020. Vol. 19, Iss. 2. pp. 82–89. DOI: 10.1515/pmp-2019-0008.
33. Zhang Wei. An analysis of the formation mechanisms of abrasive particles and their effects on cutting efficiency. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. 2022. Vol. 18, Iss. 4. pp. 1153–1167. DOI: 10.32604/fdmp.2022.019719.
34. Zhu P., Zhang G., Du J., Jiang L. et al. Removal mechanism of magnetic abrasive finishing on aluminum and magnesium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 114, Iss. 5–6. pp. 1717–1729. DOI: 10.1007/s00170-021-06952-4.
35. Akulovich L. M., Sergeev L. E. Technology and equipment for magnetic-abrasive processing of metal surfaces of various profiles. Minsk: BGATU, 2013. 372 p.

