

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ОБРАБОТКИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ В МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ МЕТОДОМ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ

© 2019

**А. Г. Бойцов** доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); [agboytsov@mail.ru](mailto:agboytsov@mail.ru)

**С. В. Курилович** аспирант кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); [gdr1111@yandex.ru](mailto:gdr1111@yandex.ru)

**В. В. Курицына** кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); [kuritzynav@mail.ru](mailto:kuritzynav@mail.ru)

**М. В. Силуянова** доктор технических наук, профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); [dc2mati@yandex.ru](mailto:dc2mati@yandex.ru)

Рассмотрены базовые схемы, особенности и преимущества магнитно-абразивной обработки. Даны общие сведения о рабочих средах для магнитно-абразивной обработки, составы ферроабразивных порошков и достигаемые их применением шероховатости обработанных поверхностей, проанализирован процесс формирования рабочего слоя. Приводится классификация схем магнитно-абразивной обработки от типа используемого магнитного индуктора, их преимущества и недостатки. Показано, что принципиальная схема магнитно-абразивной обработки, вид и дисперсность абразивной среды назначаются в зависимости от конкретных условий обработки и требований к состоянию поверхностного слоя, а выбор типа магнитного индуктора не столь очевиден, поскольку каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Представлена методика процедур экспертного оценивания при выборе приемлемой схемы магнитного индуктора из ряда альтернативных вариантов для использования в магнитно-абразивной обработке. Методика экспертного оценивания апробирована на примере работы группы экспертов из представителей науки и производства. Показано, что рациональной схемой магнитно-абразивной обработки по типу используемого индуктора является схема с электромагнитным индуктором постоянного тока. Это обусловлено простотой регулирования процесса и расширением технологических возможностей, применимостью для широкого круга задач, решаемых магнитно-абразивной обработкой. Схемы магнитно-абразивной обработки на постоянных магнитах могут рассматриваться как альтернатива схемам с постоянными магнитами.

*Магнитно-абразивная обработка; отделочная обработка; экспертная оценка.*

---

**Цитирование:** Бойцов А.Г., Курилович С.В., Курицына В.В., Силуянова М.В. Определение рациональной схемы обработки ответственных деталей газотурбинного двигателя в магнитореологических средах методом экспертной оценки // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 3. С. 38-47. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-38-47

## Введение

Поскольку состояние поверхностного слоя в значительной степени определяют эксплуатационные свойства отдельных деталей и узлов, улучшение качества поверхностного слоя ответственных деталей и агрегатов газотурбинного двигателя является одной из важнейших задач современного российского авиастроения. При этом окончательные свойства поверхности являются результатом технологического воздействия на деталь в процессе её изготовления, в особенности на финишных операциях. Для решения этой задачи можно использовать способ обработки деталей ферромагнитным абразивным порошком под действием магнитного поля. Данный метод получил название – магнитно-абразивная обработка (МАО). Он позволяет получать параметры шероховатости Ra до 0,01 мкм и снижение волнистости в 8-10 раз [1].

### Магнитно-абразивная обработка, общие сведения, классификация и рабочие среды

МАО объединяет группу технологий, в которых используется рабочая абразивная среда, обладающая магнитными свойствами. В роли рабочей среды применяют ферромагнитный абразивный порошок или однородно смешанные абразивные и ферромагнитные частицы, например магнитореологические суспензии (рис. 1).

Рабочая среда под воздействием магнитного поля изменяет свою плотность и вязкость, что приводит к образованию так называемой магнитно-абразивной «щётки», которая обеспечивает удаление материала. Регулирование плотности среды и её давления на обрабатываемую поверхность выполняется изменением величины магнитного потока.

Некоторые другие, часто применяемые схемы МАО, показаны на рис. 2.

Отделочная обработка поверхностей с помощью магнитно-реологических абразивных суспензий имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами финишной обработки:

- вязкость рабочей среды, определяющую давление абразивных частиц на обрабатываемую поверхность, можно в широком диапазоне регулировать изменением величины магнитного поля;
- эффективное охлаждение зоны обработки;
- высокая производительность с обеспечением минимальной шероховатости вплоть до нанометрического уровня.

Благодаря своим положительным качествам метод МАО получил широкий спектр применения. МАО используют при изготовлении линз и других элементов оптических систем, обработки поверхностей деталей прецизионных пар трения гидропневмоагрегатов, доводки рабочих кромок инструмента, обработки изделий из керамики, сапфира, кубического нитрида бора и других твёрдых и сверхтвёрдых материалов, снятия заусенцев и скругления кромок. Кроме того, её применяют для выполнения операций очистки поверхностей и удаления оксидных плёнок.

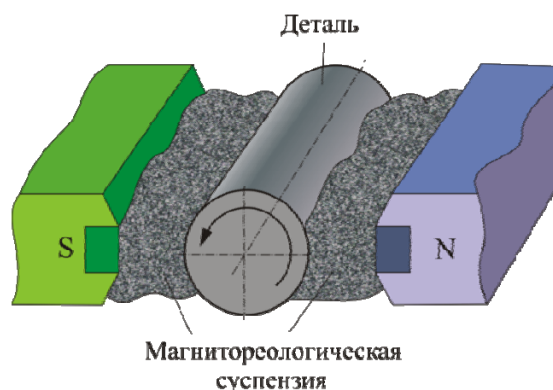


Рис. 1. Магнитно-абразивная обработка наружных поверхностей вращения

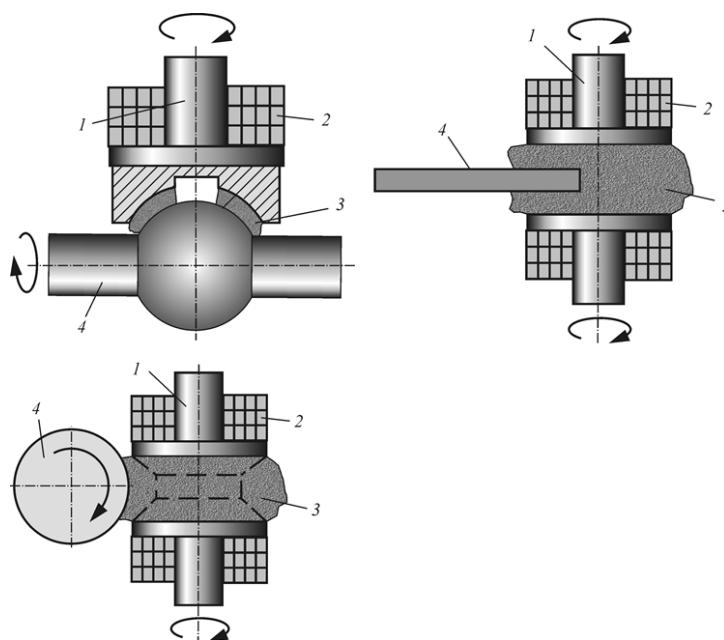


Рис. 2. Схемы МАО, применяемые для обработки различных поверхностей:  
 1 – сердечник электромагнита; 2 – катушка электромагнита;  
 3 – магнитно-абразивная среда; 4 – обрабатываемая заготовка

Процесс формирования рабочего слоя при МАО заключается в следующем. При наложении магнитного поля частицы магнитного порошка взаимодействуют между собой и выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля (рис. 3), создавая тем самым гибкую магнитно-абразивную «щётку» [2]. В результате формируется рабочий слой с жёсткостью, регулируемой величиной магнитного поля, содержащий дисперсные абразивные частицы, полирующие поверхность.

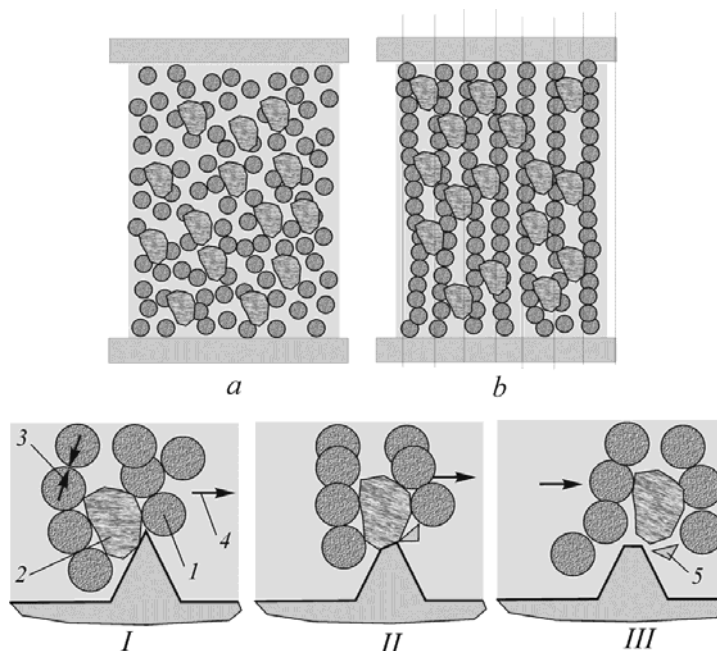


Рис. 3. «Выстраивание» магнитных частиц при наложении магнитного поля и стадии удаления неровности при использовании магнитно-абразивных суспензий:  
 1 – магнитные частицы; 2 – абразивные частицы; 3 – взаимодействие между частицами;  
 4 – направление движения частиц; 5 – удалённый материал

В настоящее время общепризнано классифицировать схемы МАО по трём функциональным признакам:

- по функциональному назначению магнитного поля;
- по форме обрабатываемых поверхностей;
- по типу используемого магнитного индуктора.

Классификация МАО представлена в табл. 1.

Таблица 1. Классификация магнитно-абразивной обработки

По функциональному назначению магнитного поля	По форме обрабатываемых поверхностей	По типу используемого магнитного индуктора
I – магнитное поле формирует из порошковой ферромагнитной абразивной массы режущий инструмент с управляемой жёсткостью и создаёт силы резания II – магнитное поле формирует из порошковой ферромагнитной абразивной массы режущий инструмент с управляемой жёсткостью, создаёт силы резания и сообщает режущему инструменту движения резания III – магнитное поле сообщает силы и движения резания несформированной массе ферромагнитного абразивного порошка IV – магнитное поле сообщает необходимые для резания движения непосредственно заготовке или абразивному инструменту V – магнитное поле в зоне обработки интенсифицирует или улучшает качественные характеристики существующих абразивных способов обработки	А – схемы обработки наружных поверхностей вращения Б – схемы обработки внутренних поверхностей вращения В – схемы обработки плоскостей и линейчатых фасонных поверхностей Г – схемы обработки трёхмерных фасонных поверхностей	1 – схемы с электромагнитными индукторами постоянного тока 2 – схемы с электромагнитными индукторами переменного тока 3 – схемы с электромагнитными индукторами трёхфазного тока 4 – схемы с индукторами на постоянных магнитах
Каждой схеме МАО присваивается шифр согласно вышеуказанной классификации, например: I-A-1.		

В процессе получения ферромагнитных абразивных порошков увлажнённое порошковое железо смешивается с абразивным порошком и связующим [3]. Полученную смесь перемешивают до получения гомогенной структуры и нагревают для дегидратации композиции. Формируют ферромагнитный порошок с необходимым размером зёрен путём протирания через соответствующие калибровочные сита [4; 5].

Некоторые составы порошков и значения шероховатости, получаемые при их использовании, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Составы ферроабразивных порошков для магнитно-абразивной обработки

Состав	Зернистость порошка, мкм	Параметры шероховатости, мкм
20-30% 32A + 80-70%Fe Зернистость 32A – 60 мкм	250	0,16
	200	0,08
	100	0,063
	60	0,05
20-30% 32A + 80-70%Fe Зернистость 32A – 40 мкм	250	0,08
	200	0,063
	100	0,05
	60	0,04
20-30% 32A + 80-70%Fe Зернистость 32A – 20 мкм	250	0,063
	200	0,05
	100	0,04
	60	0,032

Принципиальная схема МАО, вид и дисперсность абразивной среды назначаются в зависимости от конкретных условий обработки и требований к состоянию поверхностного слоя, а выбор типа магнитного индуктора не столь очевиден, поскольку каждый из них имеет свои преимущества и недостатки (табл. 3).

От выбора типа магнитного индуктора при МАО зависят параметры создаваемого им магнитного поля, плотность и вязкость рабочей среды, создание магнитно-абразивной «щётки» [6;7], а следовательно производительность и качество обработки. Для выбора рационального типа магнитного индуктора при создании промышленной установки МАП была проведена научно-техническая экспертиза средствами метода экспертных оценок.

Таблица 3. Преимущества и недостатки схем МАО по типу магнитного индуктора

	<b>Схемы с электромагнитными индукторами постоянного тока</b>	<b>Схемы с электромагнитными индукторами переменного тока</b>	<b>Схемы с электромагнитными индукторами трёхфазного тока</b>	<b>Схемы с индукторами на постоянных магнитах</b>
<b>Преимущества</b>	Возможность регулирования напряжённости магнитного поля	Возможность регулирования напряжённости магнитного поля	Возможность формирования вращающегося магнитного поля для перемещения магнитно-абразивной среды	Стабильность магнитного поля. Нет необходимости в электропитании (энергоэффективность)
<b>Недостатки</b>	Дополнительные элементы для преобразования постоянного тока в переменный	Специальные конструкции индукторов с демпфирующими витками для предотвращения вибраций	Сложность и высокая стоимость реализации схемы	Необходимость в дорогостоящих профилированных магнитах (альнико, самарий-кобальтовые ферриты и др.). Сложность удаления абразива с поверхностей магнита

### **Экспертная оценка схем МАО по типу используемых магнитных индукторов**

В формируемую группу экспертов для проведения экспертизы были приглашены компетентные и имеющие опыт работы по МАО представители науки, производства и высшего образования. В табл. 4 представлен состав экспертной группы с учётом коэффициента квалификации  $i$ -го эксперта –  $p_i$  (принято, что оценка зависит от учёной степени эксперта) и коэффициента значимости «веса»  $i$ -го эксперта –  $k_i$  (принято, что оценка зависит от стажа работы в исследуемой области).

Таблица 4. Состав экспертной группы

Номер, $j$	Эксперт	Коэффициент квалификации эксперта		Коэффициент значимости (вес) эксперта	
		абсолютная оценка, $p_i$	относительная оценка, $p'_i$	абсолютная оценка, $k_i$	относительная оценка, $k'_i$
1	Эксперт 1	80	0,26	60	0,22
2	Эксперт 2	100	0,32	90	0,33
3	Эксперт 3	80	0,26	70	0,26
4	Эксперт 4	50	0,16	50	0,19
Сумма		310	1	270	1

В процессе формирования массива критериев [8] в подсистеме организации экспертизы учитываются: функциональные показатели качества (технологические возможности и широта области схемы, качество получаемой поверхности (шероховатость, волнистость и др.)), технологические показатели (удельная магнитная сила, надёжность индуктора, кинематическая простота установки), эргономические и экономические показатели (стоимость реализации установки, энергоёмкость, расход ферромагнитного абразивного порошка (материалоёмкость)):

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n a_i p_i k_i}{\sum_{i=1}^n p_i k_i}. \quad (1)$$

Для обобщённой оценки ( $A$ ) необходимо собрать оценки, данные  $i$ -м экспертом каждой схеме МАО по каждому из критериев ( $a_i$ ), и провести расчёт по формуле (1) с учётом коэффициентов квалификации и значимости экспертов [9;10]:

$$W = \frac{12S}{n^2(M^3M)}, \quad (2)$$

где  $S$  – сумма квадратов отклонений всех оценок рангов каждого объекта экспертизы от среднего значения;  $n$  – число экспертов;  $M$  – количество критериев объекта экспертизы.

Согласованность экспертов оценивалась методом ранговой корреляции с ранжированием критериев по важности всеми экспертами [11]. Степень согласованности мнений экспертов в теории ранговой корреляции выражается через коэффициент конкордации (коэффициент согласованности мнений экспертов) (2) [12].

Интегральная (комплексная) оценка технологических альтернатив [13;14] рассчитывалась по формуле:

$$Q_m = \sum_j f'_{jm}.$$

Здесь  $f'_{jm}$  – показатель качества сравниваемых вариантов  $m$  по каждому  $j$ -му критерию, определяемый по формуле:

$$f'_{jm} = F_{jm} a'_j,$$

где  $F_{jm}$  – удовлетворение  $m$ -го варианта решения степени удовлетворения требований по каждому  $j$ -му критерию;  $q'_j$  – значимость (важность)  $j$ -го критерия.

Результаты интегральной экспертной оценки выбора типа магнитного индуктора для создания приемлемой схемы МАО представлены в табл. 5.

Таблица 5. Значения интегральной оценки

Тип индуктора	$Q_m$
Электромагнитный индуктор постоянного тока	55,41
Электромагнитный индуктор переменного тока	49,26
Электромагнитный индуктор трёхфазного тока	52,19
Индуктор на постоянных магнитах	54,36

### Заключение

Рассмотрена методика процедур экспертного оценивания при выборе приемлемой схемы магнитного индуктора из ряда альтернативных вариантов. Методика апробирована при работе группы экспертов из представителей науки и производства, занимающихся вопросами МАО. Показано, что рациональной схемой магнитно-абразивной обработки по типу используемого индуктора является схема с электромагнитным индуктором постоянного тока, что обусловлено простотой регулирования параметров процесса МАО и широтой возможностей по применению его в различных типах оборудования для магнитно-абразивной обработки.

### Библиографический список

1. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. Минск: Наука и техника, 1981. 328 с.
2. Сакулевич Ф.Ю., Минин Л.К., Олендер Л.А. Магнитно-абразивная обработка точных деталей. Минск: Высшая школа, 1977. 287 с.
3. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Л.: Машиностроение, 1986. 176 с.
4. Матюха П.Г., Бурдин А.В. Современные тенденции развития магнитно-абразивной обработки // Научные труды Донецкого национального технического университета. 2009. № 6. С. 166-173.
5. Хомич Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий. Минск: БНТУ, 2006. 218 с.
6. Kumar H., Singh S., Kumar P. Magnetic abrasive finishing- a review // International Journal of Engineering Research and Technology. 2013. V. 2, Iss. 3.
7. Lin C.-T., Yang L.-D., Chow H.-M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method // International Journal of Advance Manufacturing Technology. 2007. V. 34, Iss. 1-2. P. 122-130. DOI: 10.1007/s00170-006-0573-8
8. Jain V.K., Kumar P., Behera P.K., Jayswal S.C. Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process // Wear. 2001. V. 250, Iss. 1-12. P. 384-390. DOI: 10.1016/s0043-1648(01)00642-1

9. Бойцов А.Г., Курицына В.В., Дудаков В.Б. Научно-техническая экспертиза инновационных проектов и решений: учеб. пособие. М.: Щербинская типография, 2017. 274 с.

10. Силуянова М.В., Курицына В.В., Иосифов П.А. Стратегии, методы и модели управления технологическим развитием производств авиационно-космического машиностроения. М.: МАИ, 2016. 158 с.

11. Силуянова М.В., Курицына В.В. Инструментальные средства технологического аудита в многовариантных задачах управления наукоёмким производством // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 1 (65). С. 226-235.

12. Курицына В.В., Силуянова М.В. Автоматизация процедур технологического менеджмента в производстве авиакосмической техники // СТИН. 2017. № 9. С. 5-11.

13. Курицына В.В., Силуянова М.В., Сильченко О.Б. Автоматизация процедур технологической экспертизы в принятии производственных решений // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72, № 5. С. 199-207.

14. Силуянова М.В., Курицына В.В., Бойцов А.Г. Модели и методы технологического аудита наукоёмких производств. М.: МАИ, 2017. 158 с.

## DETERMINING A RATIONAL SCHEME OF MACHINING OF GAS TURBINE ENGINE ESSENTIAL PARTS IN MAGNETORHEOLOGICAL ENVIRONMENTS BY THE METHOD OF EXPERT ASSESSMENT

© 2019

**A. G. Boytsov** Doctor of Science (Engineering), Head of Department;  
Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, Russian Federation;  
[agboytsov@mail.ru](mailto:agboytsov@mail.ru)

**S. V. Kurilovich** Postgraduate Student;  
Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, Russian Federation;  
[gdr1111@andex.ru](mailto:gdr1111@andex.ru)

**V. V. Kuritsyna** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor;  
Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, Russian Federation;  
[kuritzynav@mail.ru](mailto:kuritzynav@mail.ru)

**M. V. Siluyanov** Doctor of Science (Engineering), Professor;  
Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, Russian Federation;  
[dc2mati@yandex.ru](mailto:dc2mati@yandex.ru)

The paper examines the basic schemes, features and advantages of magnetic abrasive machining. In this work we provide information on working environments for magnetic abrasive machining, compositions of ferro-abrasive powders and roughness of the surfaces achieved by their application; the process of forming the working layer is also analyzed. A classification of magnetic abrasive machining schemes according to the type of the magnetic inductor used, as well as their advantages and disadvantages are discussed. It is shown that the basic scheme of magnetic abrasive machining, the kind and dispersion of the abrasive medium, are assigned depending on the specific machining conditions and the requirements for the surface layer condition, whereas the choice of the type of the magnetic inductor is not so obvious, since each of the types has its advantages and disadvantages. An expert assessment procedure in choosing an acceptable magnetic-inductor scheme from a number of alternatives for use in magnetic abrasive machining is presented. The method of expert assessment was tested drawing on the example of the work of a group of experts formed by representatives of science



and industry. It is shown that the direct-current electromagnetic inductor scheme is a rational scheme of magnetic abrasive machining according to the type of inductor used. This is due to the simplicity of process control and the expansion of technological capabilities, applicability for a wide range of problems solved by magnetic abrasive machining. Permanent-magnet magnetic abrasive schemes can be considered as an alternative to permanent-magnet ones.

*Magnetic abrasive machining; final treatment; expert assessment.*

---

*Citation:* Boytsov A.G., Kurilovich S.V., Kuritsyna V.V., Siluyanova M.V. Determining a rational scheme of machining of gas turbine engine essential parts in magnetorheological environments by the method of expert assessment. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 3. P. 38-47. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-38-47

## References

1. Sakulevich F.Yu. *Osnovy magnitno-abrazivnoy obrabotki* [Basics of magnetic abrasive processing]. Minsk: Nauka i Tekhnika Publ., 1981. 328 p.
2. Sakulevich F.Yu., Minin L.K., Olender L.A. *Magnitno-abrazivnaya obrabotka tochnykh detaley* [Magnetic abrasive machining of precision parts]. Minsk: Vysshaya Shkola Publ., 1977. 287 p.
3. Baron Yu.M. *Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdeliy i rezhushchikh instrumentov* [Magnetic abrasive and magnetic machining of products and cutting tools]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1986. 176 p.
4. Matjuha P.G., Burdin A.V. Actual advance directions of magnetic-abrasive machining. *Nauchnye Trudy Donetskogo Natsional'nogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2009. No. 6. P. 166-173. (In Russ.)
5. Khomich N.S. *Magnitno-abrazivnaya obrabotka izdeliy* [Magnetic abrasive machining of products]. Minsk: Belarusian National Technical University Publ., 2006. 218 p.
6. Kumar H., Singh S., Kumar P. Magnetic abrasive finishing- a review. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2013. V. 2, Iss. 3.
7. Lin C.-T., Yang L.-D., Chow H.-M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method. *International Journal of Advance Manufacturing Technology*. 2007. V. 34, Iss. 1-2. P. 122-130. DOI: 10.1007/s00170-006-0573-8
8. Jain V.K., Kumar P., Behera P.K., Jayswal S.C. Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process. *Wear*. 2001. V. 250, Iss. 1-12. P. 384-390. DOI: 10.1016/s0043-1648(01)00642-1
9. Boytsov A.G., Kuritsyna V.V., Dudakov V.B. *Nauchno-tekhnicheskaya ekspertiza innovatsionnykh proektov i resheniy: ucheb. posobie* [Strategies, methods and models of managing technological development of aerospace engineering facilities]. Moscow: Shcherbinskaya Tipografiya Publ., 2017. 274 p.
10. Siluyanova M.V., Kuritsyna V.V., Iosifov P.A. *Strategii, metody i modeli upravleniya tekhnologicheskim razvitiem proizvodstv aviatsionno-kosmicheskogo mashinostroeniya* [Strategies, methods and models of managing technological development of aerospace engineering facilities]. Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 2016. 158 p.
11. Siluyanova M.V., Kuritsyna V.V. Instrumental means of technology audit in multivariate problems of high-tech industries. *Technology of Technosphere Safety*. 2016. No. 1 (65). P. 226-235. (In Russ.)
12. Kuritsyna V.V., Siluyanova M.V. Automated management in aerospace production. *Russian Engineering Research*. 2018. V. 38, Iss. 3. P. 201-207. DOI: 10.3103/s1068798x18030085

13. Kuritsyna V.V., Siluyanova M.V., Silchenko O.B. Automation of procedures for technological expertise at production decisionmaking. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*. 2018. V. 72, no 5. P. 199-207. (In Russ.)

14. Siluyanova M.V., Kuritsyna V.V., Boytsov A.G. *Modeli i metody tekhnologicheskogo audita naukoemkikh proizvodstv* [Models and methods of technology audit of high-tech industries]. Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 2017. 158 p.