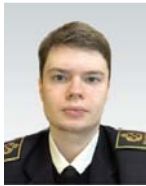


# Особенности контроля качества сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевых сплавов в процессе магнитно-абразивного воздействия

УДК 621.923



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



**Д. Д. Максимов,**  
аспирант кафедры машиностроения,  
эл. почта: itmwasako@gmail.com



**М. С. Синюков,**  
магистрант кафедры машиностроения,  
эл. почта: sms-0305@yandex.ru

Санкт-Петербургский горный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

## Введение

Современный уровень техники и технологий предъявляет повышенные требования к изделиям и их рабочим поверхностям [1–3]. С развитием литейного и металлорежущего оборудования становится возможным изготавливать детали с поверхностями сложной формы, которые должны соответствовать всем показателям качества установки, в которой они применяются [4, 5]. Применение изделий сложной формы часто приводит к упрощению конструкций машин, а также расширению их потенциальных и функциональных возможностей, повышению эксплуатационных характеристик, надежности, ресурса работы, эргономических показателей [6, 7]. Поэтому современное машиностроение должно обеспечить возможность изготовления изделий, имеющих ответственные эксплуатационные поверхности сложной формы, характеризующиеся высоким качеством [8, 9].

Изготовление изделий со сложнопрофильными поверхностями и контроль качества этих поверхностей являются сложным, многофакторным процессом, в котором большое значение имеют как методика обработки, так и способы контроля качества [10, 11]. В настоящее время существуют технологии числового программного управления (ЧПУ), позволяющие реализовать сложную траекторию движения режущего инструмента, а также, например, щупа профилометра [12]. Однако обеспечение качества

Рассмотрен вопрос технологического обеспечения качества сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевых сплавов и контроля качества данных поверхностей. Представлены особенности изготовления сложнопрофильных изделий. Проведен анализ негативных факторов, возникающих в процессе лезвийной обработки алюминиевых сплавов.

Исследование проведено с целью разработки такого способа обработки сложнопрофильных изделий, который будет обеспечивать равномерность обработки и качество по всему профилю обрабатываемой поверхности. Объектом исследования является процесс магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевых сплавов, а предметом исследования — шероховатость обработанной сложнопрофильной поверхности.

Предложен способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей, при котором рабочие поверхности магнитов описывают профиль обрабатываемой поверхности. В качестве подтверждения работоспособности предлагаемого способа обработки проведено комплексное моделирование процесса магнитно-абразивной обработки. Получены результаты моделирования магнитного поля в рабочем зазоре, график распределения магнитной индукции вдоль средней линии рабочего зазора. Проведена оценка динамики магнитно-абразивной массы в процессе магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности.

Результаты проведенных исследований позволяют оценить влияние динамики магнитно-абразивной массы на шероховатость обработанной поверхности. Качество обработанной поверхности обеспечивается в необходимой мере на тех участках сложнопрофильной поверхности, где динамика магнитно-абразивной массы в процессе обработки была выше.

**Ключевые слова:** магнитно-абразивная обработка, алюминиевые сплавы, контроль качества, шероховатость поверхности, обработка алюминиевых сплавов, окончательная обработка, рабочий зазор, сложнопрофильная поверхность.

**DOI:** 10.17580/tsm.2023.04.13

сложнопрофильной поверхности зависит не только от применяемой технологии, но и от обрабатываемого материала [13].

В процессе резания в связи с высокой вязкостью алюминиевых сплавов на передней поверхности режущего инструмента возникает нарост, который имеет повышенную микротвердость по сравнению с обрабатываемым алюминиевым сплавом [14, 15]. Высокие пластичность, коррозионная стойкость, некоторые механические и термические свойства алюминиевых сплавов являются уникальными и привлекательными для ряда отраслей промышленности [16, 17]. Поэтому в настоящее время исследователи и производители занимаются поиском оптимального метода окончательной

обработки алюминиевых сплавов, который будет способен обеспечить качество обрабатываемой поверхности [18].

Способ окончательной обработки сложнопрофильных поверхностей в значительной мере оказывает влияние на контроль качества этих поверхностей [19–21]. Необходимо использовать такой способ окончательной обработки, природа которого будет достаточно изучена, механизм взаимодействия внутри процесса обработки понятен. Тогда ряд контролируемых параметров, например шероховатость, микротвердость поверхности, волнистость, будут иметь практически одинаковые значения по всей обработанной сложнопрофильной поверхности.

Целью данной работы является разработка такого способа обработки сложнопрофильных изделий, который будет обеспечивать равномерность обработки и качество по всему профилю обрабатываемой поверхности.

### Материал и методика проведения исследований

Одним из способов окончательной обработки сложнопрофильных изделий из алюминиевых сплавов является магнитно-абразивная обработка [22]. В процессе магнитно-абразивной обработки резание происходит за счет взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью [23–25]. При этом абразивное зерно удерживается несколькими зернами из ферромагнитного материала [26]. Таким образом, в общей магнитно-абразивной массе можно выделить значительное множество ячеек, состоящих из одного абразивного зерна и нескольких ферромагнитных зерен.

Формирование магнитного поля может происходить как за счет собственной энергии постоянных магнитов, так и за счет энергии электрического тока, который подается на катушку индуктивности [27]. Следует отметить, что при обоих вариантах формирования магнитного поля режущим инструментом является магнитно-абразивный порошок, а площадка, на которой он находится, называется полюсом [28]. Различная полярность полюсов создает магнитное поле, которое имеет линии магнитной индукции и эквипотенциальные линии [29, 30].

На каждую из ячеек, состоящих из магнитных и ферромагнитных частиц, действуют силы магнитного поля. В теории магнитно-абразивной обработки принято считать, что сила магнитно-абразивной массы в магнитном поле  $F$  имеет две составляющие: силу  $F_x$ , действующую вдоль линий магнитной индукции, и силу  $F_y$ , действующую вдоль эквипотенциальных линий [31–33]. Сила  $F_x$  направлена

вдоль обрабатываемой поверхности и заставляет ферромагнитные зерна, а вместе с ними и магнитное зерно, проходить по обрабатываемой поверхности, осуществляя снятие материала. Сила  $F_y$  направлена перпендикулярно силе  $F_x$  и способствует внедрению абразивного зерна в поверхность заготовки. Силы  $F_x$  и  $F_y$  описываются уравнением (1):

$$F_x = V_\chi \frac{dH}{dx}; F_y = V_\chi \frac{dH}{dy}, \quad (1)$$

где  $V$  — объем магнитно-абразивной массы,  $m^3$ ,  $\chi$  — магнитная проницаемость магнитно-абразивной массы;

$\frac{dH}{dx}$  и  $\frac{dH}{dy}$  — скорости изменения напряженности магнитного поля вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно.

Результирующая сила  $F$  описывается уравнением (2):

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = V_\chi \sqrt{\left(\frac{dH}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dH}{dy}\right)^2}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) видно, что напряженность магнитного поля, а также количество магнитно-абразивной массы и ее свойства являются ключевыми параметрами, влияющими на результирующую силу магнитно-абразивной массы в магнитном поле  $F$ .

Известно, что одним из режимных параметров магнитно-абразивной обработки является величина рабочего зазора — расстояние от рабочей поверхности полюсного наконечника до обрабатываемой поверхности заготовки [34]. При обработке сложнопрофильных поверхностей полюсами с плоскими рабочими поверхностями величина рабочего зазора будет изменяться по всему профилю обрабатываемой поверхности [35]. Следовательно, будет изменяться объем магнитно-абразивной массы  $V$ , который определяет результирующую силу  $F$  согласно уравнению (2).

Изменение объема магнитно-абразивной массы  $V$  негативно скажется на качестве обработанной поверхности, приведет к неравномерности обработки сложнопрофильной поверхности (рис. 1).

Неравномерное распределение магнитно-абразивной массы по рабочему зазору приводит к возникновению

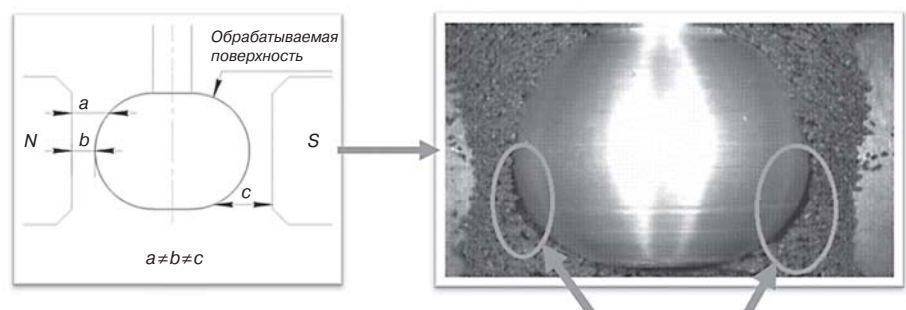
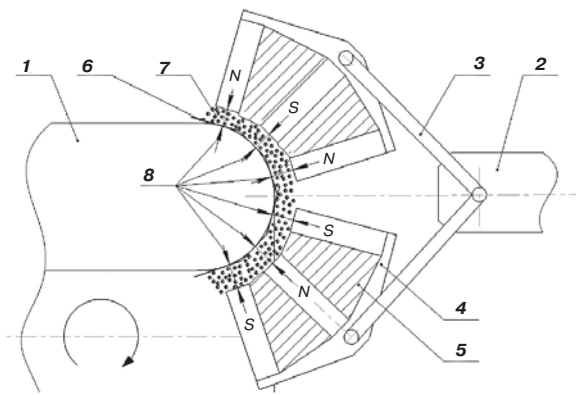


Рис. 1. Образование «слепых» зон при неравнозначном рабочем зазоре:  $N, S$  — полюса установки для магнитно-абразивной обработки;  $a, b, c$  — величины рабочего зазора

нескольких участков по всему профилю обрабатываемой поверхности, на которых обработка будет осуществляться при отличных друг от друга режимных параметрах.

Первоочередной задачей при технологическом обеспечении качества сложнопрофильных изделий посредством применения метода магнитно-абразивной обработки является создание способа обработки, позволяющего исключить неравномерное распределение магнитно-абразивной массы и сил магнитного поля.

Применение плоских полюсных наконечников, на которых формируется непостоянное магнитное поле, не позволяет решить поставленную задачу. При этом формирование непостоянного магнитного поля на полюсных наконечниках сложной формы также невозможно, так как магнитное поле будет концентрироваться на наиболее отдаленных от магнитопровода частях полюсов.



**Рис. 2.** Способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей:  
 1 — обрабатываемая заготовка; 2 — устройство; 3 — кронштейн; 4 — кассета; 5 — магнитопровод; 6 — касательные к обрабатываемой поверхности; 7 — магнитно-абразивная масса; 8 — рабочий зазор

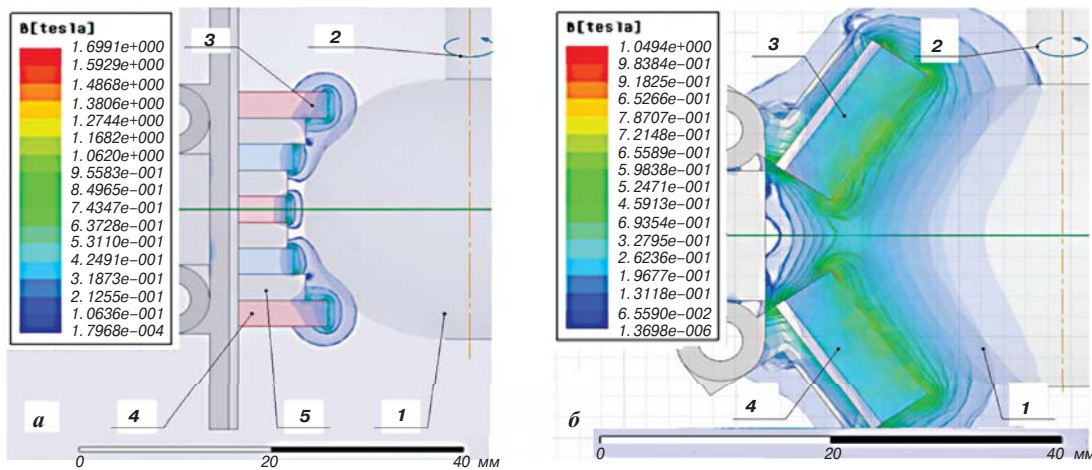
В связи с этим предложено использовать постоянные магниты для формирования постоянного магнитного поля. Набором таких магнитов возможно описать практически любой сложный профиль обрабатываемой заготовки (**рис. 2**).

Предлагаемый способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей характеризуется постоянным рабочим зазором по всему обрабатываемому профилю. Это обеспечивается благодаря расположению рабочих поверхностей постоянных магнитов параллельно касательным к обрабатываемой поверхности.

Постоянные магниты, выполненные из материала Nd – Fe – В марки N48 с остаточной магнитной индукции на поверхности 1,38–1,42 Тл, помещали в кассету, сформированную из чередующихся постоянных магнитов различной полярности и магнитопровода. По результатам моделирования в программном комплексе ANSYS Maxwell предлагаемый способ обеспечивает равномерность распределения магнитного поля в рабочем зазоре. Магнитное поле оценивали по величине магнитной индукции  $B$ .

Проведено моделирование распределения магнитной индукции в рабочем зазоре устройства, постоянные магниты которого расположены вдоль одной прямой и на одной плоскости устройства, но имеющие разный вылет относительно этой плоскости (**рис. 3, а**). Такой вариант исполнения устройства обеспечивает равномерный рабочий зазор, но не учитывает непараллельность рабочих плоскостей постоянных магнитов касательным к этой поверхности.

Далее проведено моделирование распределения магнитной индукции в рабочем зазоре устройства, постоянные магниты которого расположены параллельно касательным к обрабатываемой поверхности (см. рис. 3, б). Видно, что распределение магнитной индукции является равномерным.



**Рис. 3.** Распределение магнитной индукции в рабочем зазоре (вид с экрана монитора):  
 а — магниты расположены вдоль прямой, рабочие поверхности на разных плоскостях; б — рабочие поверхности магнитов параллельны касательным к обрабатываемой поверхности;  
 1 — обрабатываемая заготовка; 2 — вращательное движение заготовки; 3 — магниты полярности N; 4 — магниты полярности S; 5 — металлические проставки



### Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенных исследований получен график распределения магнитной индукции  $B$  вдоль средней линии рабочего зазора (рис. 4) для устройства, постоянные магниты которого расположены параллельно касательным к обрабатываемой поверхности. Согласно графику, магнитная индукция распределяется равномерно. В центральной точке наблюдения отмечено резкое падение значения магнитной индукции  $B$  на 0,1 Тл. В остальных точках наблюдения по профилю обрабатываемой поверхности магнитная индукция  $B$  принимает в среднем значения от 0,5 до 0,6 Тл, что является оптимальным для проведения обработки сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевых сплавов.

Тем не менее динамика магнитно-абразивной массы в центральной точке наблюдения может несколько отличаться от динамики в остальных точках наблюдения. Поэтому проведено моделирование динамики этой массы в процессе обработки. На рис. 5 показано состояние магнитно-абразивной массы через 30 с после начала обработки. Видно, что она скопилась в полости между постоянными магнитами и не двигается там, однако в непосредственном контакте с обрабатываемой поверхностью находится преимущественно

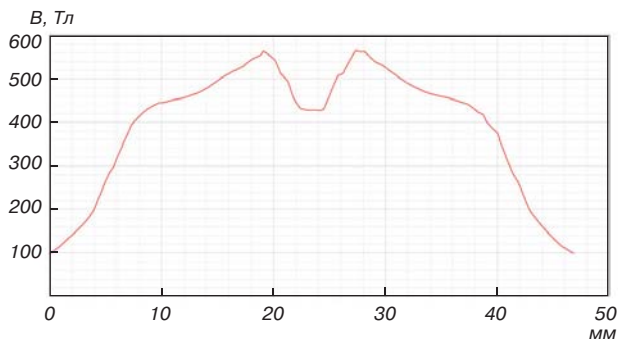


Рис. 4. График распределения магнитной индукции вдоль средней линии рабочего зазора

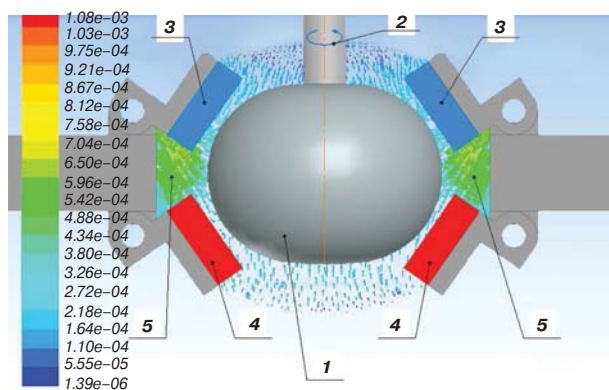


Рис. 5. Динамика магнитно-абразивной массы в процессе обработки:  
1 — обрабатываемая заготовка; 2 — вращательное движение заготовки; 3 — магниты полярности  $N$ ; 4 — магниты полярности  $S$ ; 5 — скопления малоподвижной магнитно-абразивной массы

но движущаяся магнитно-абразивная масса. Плотность магнитно-абразивных частиц по всему профилю обрабатываемой поверхности приблизительно равна.

Изготовлена реальная конструкция устройства для осуществления предлагаемого способа обработки сложнопрофильных поверхностей (рис. 6).

Для оценки влияния величины рабочего зазора на обрабатываемость сферических заготовок из алюминиевого сплава АМц проведена первая серия (три опыта) экспериментальных исследований. Обработку проводили при следующих режимных параметрах: длительность обработки  $t = 12$  мин; магнитная индукция  $B = 0,8$  Тл; подача  $S = 50$  мм/об.; частота вращения  $n = 360$  с<sup>-1</sup>; масса магнитно-абразивного порошка  $q = 180$  г; рабочий зазор  $\delta = 1,5; 3,0$  и  $4,5$  мм.

С увеличением величины рабочего зазора  $\delta$  отмечено ухудшение качества поверхностного слоя деталей сферической формы из алюминиевого сплава при магнитно-абразивной обработке. По полученным результатам построен график величины зависимости  $\Delta Ra$  от  $\delta$  (рис. 7), где экспоненциальная зависимость описывается функцией  $\Delta Ra = 1,5962^{-0,3031\delta}$ .

По результатам второй серии экспериментов предлагаемый способ магнитно-абразивной обработки изделия из сплава АМц, имеющего сложнопрофильную

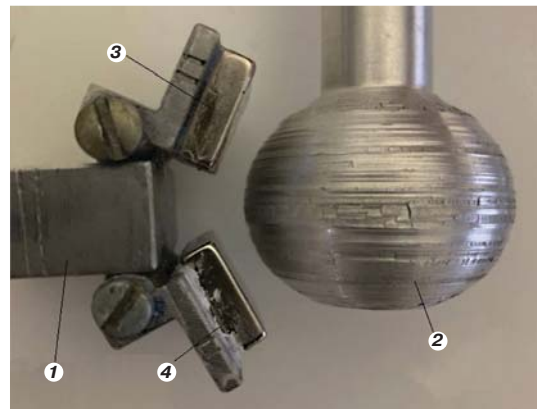


Рис. 6. Устройство для осуществления предлагаемого способа обработки:  
1 — держатель; 2 — обрабатываемая заготовка; 3 — магниты полярности  $N$ ; 4 — магниты полярности  $S$

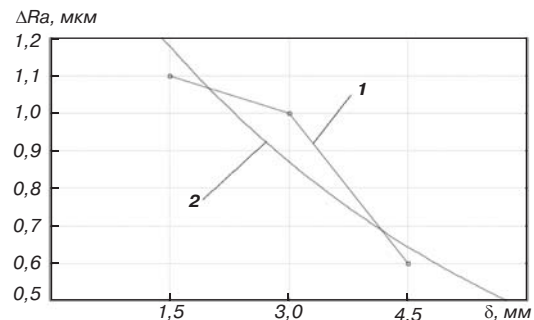


Рис. 7. Зависимость изменения шероховатости поверхности  $\Delta Ra$  от величины рабочего зазора  $\delta$  для линейной (1) и экспоненциальной (2) зависимостей

поверхность радиусом скругления  $R = 15$  мм, позволил обеспечить равномерный съем материала по всей обрабатываемой поверхности. Значение шероховатости обработанной поверхности составило  $Ra = 0,785$  мкм (шероховатость необработанной поверхности  $Ra = 1,322$  мкм) (рис. 8). Шероховатость обработанной поверхности измеряли на трех участках: на уровне магнита полярности  $N$  (см. рис. 8, а), на уровне

скопления малоподвижной магнитно-абразивной массы (см. рис. 8, б) и на уровне полярности  $S$  (см. рис. 8, в).

Обработку проводили в течение 5 мин при рабочем зазоре 1 мм, величине магнитной индукции в рабочем зазоре  $B = 0,5-0,6$  Тл, массе магнитно-абразивного порошка — 180 г, зернистости магнитно-абразивного порошка 180–250.

Таким образом подтверждено, что предлагаемый способ магнитно-абразивной обработки позволяет обеспечить равномерное качество обрабатываемой поверхности по всему сложному профилю. В первую очередь это достигается благодаря равномерному объему магнитно-абразивной массы  $V$  и напряженности магнитного поля  $H$ .

### Заключение

В ходе проведенных исследований установлено, что технологическое обеспечение качества сложнопрофильных поверхностей методом магнитно-абразивной обработки возможно при соблюдении следующих условий:

- постоянной величине рабочего зазора по всему профилю обрабатываемой поверхности;
- равномерном распределении по рабочему зазору объема магнитно-абразивной массы  $V$  и равномерном значении магнитной индукции  $B$ ;
- достижению магнитно-абразивной массы, находящейся в непосредственном контакте с обрабатываемой поверхностью.

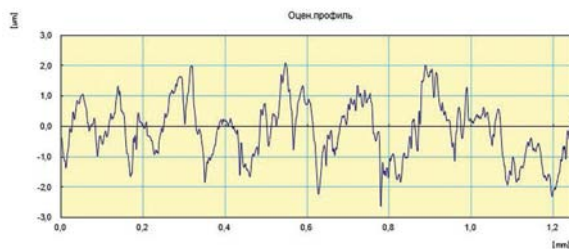
Результаты моделирования распределения магнитной индукции в рабочем зазоре устройства, постоянные магниты которого расположены параллельно касательным к обрабатываемой поверхности, показали, что распределение магнитной индукции является равномерным. При этом магниты, изготовленные из материала Nd – Fe – В с остаточной магнитной индукцией на поверхности 1,38–1,42 Тл, формируют магнитное поле в рабочем зазоре со средним значением магнитной индукции, составляющим 0,6–0,7 Тл.

Скопления неподвижной магнитно-абразивной массы негативно воздействуют на качество обработанной поверхности. Результаты экспериментального исследования показали, что в местах, в которых была меньшая динамика магнитно-абразивной массы, показатели шероховатости  $Ra$  достигают больших значений. Однако предлагаемый способ окончательной обработки позволяет обеспечить качество сложнопрофильной поверхности по всему профилю.

При величине рабочего зазора 1 мм, значении магнитной индукции в рабочем зазоре, составляющем 0,5–0,6 Тл, массе магнитно-абразивного порошка 180 г, зернистости магнитно-абразивного порошка 180–250 мкм и длительности обработки 5 мин обеспечен равномерный съем материала по всей обрабатываемой сложнопрофильной поверхности и получена обработанная поверхность с шероховатостью  $Ra = 0,785$  мкм.

## Mitutoyo

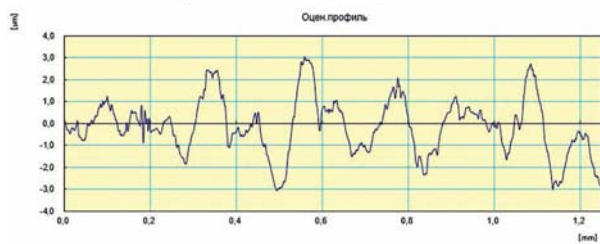
### Протокол измерений



Название продукт	Образец	Оператор	Mitutoyo
Инструменты изм	SurfTest	Комментарий	Ver2.00
Ra	0.785 μm		
Rz	3.739 μm		

## Mitutoyo

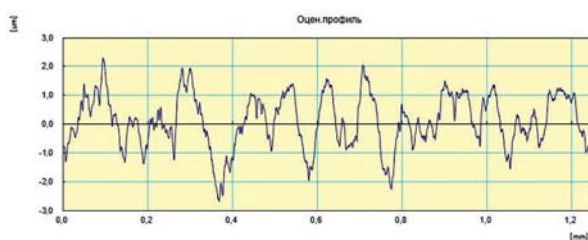
### Протокол измерений



Название продукт	Образец	Оператор	Mitutoyo
Инструменты изм	SurfTest	Комментарий	Ver2.00
Ra	0.995 μm		
Rz	4.760 μm		

## Mitutoyo

### Протокол измерений



Название продукт	Образец	Оператор	Mitutoyo
Инструменты изм	SurfTest	Комментарий	Ver2.00
Ra	0.776 μm		
Rz	4.721 μm		

Рис. 8. Профилограмма участков обработанной поверхности: а — участок на уровне магнита полярности  $N$ ; б — участок на уровне скопления малоподвижной магнитно-абразивной массы; в — участок на уровне магнита полярности  $S$  (вид с экрана монитора)

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ



*Tsvetnye Metally*. 2023. No. 4. pp. 96–102  
DOI: 10.17580/tsm.2023.04.13

## QUALITY CONTROL OF COMPLEX CONTOUR SURFACES IN ALUMINIUM ALLOY ITEMS DURING MAGNETIC ABRASIVE FINISHING

### Information about authors

V. V. Maksarov, Dean of the Mechanical Engineering Faculty<sup>1</sup>, Professor, Doctor of Technical Sciences, e-mail: maks78.54@mail.ru  
D. D. Maksimov, Postgraduate Student at the Department of Mechanical Engineering<sup>1</sup>, e-mail: imwacako@gmail.com  
M. S. Sinyukov, Master's Student at the Department of Mechanical Engineering<sup>1</sup>, e-mail: sms-0305@yandex.ru

<sup>1</sup>Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

### Abstract

This paper examines the problem of monitoring and ensuring the surface quality of complex geometry items made of aluminium alloys. The authors describe the process features related to the manufacturing of complex geometry items and analyze negative factors associated with edge cutting machining of aluminium alloys.

This research aimed at developing such a technique that would ensure uniformity and quality along the entire contour of the machined surface. The object of research is the process of magnetic abrasive finishing of complex contour surfaces in aluminium alloy items, whereas the subject of research is the roughness of the machined complex contour surface. The paper describes a process of magnetic abrasive finishing designed for complex contour surfaces when the magnetic surfaces follow the contour of the machined surface. To prove the practicability of the proposed process, the authors built a comprehensive model of the process. Thus, a model of the magnetic field in the working gap and a graph showing the distribution of magnetic induction along the center line of the working gap were built. The authors analyzed the dynamics of the magnetic-abrasive mass during magnetic abrasive finishing of a complex contour surface.

The results of the conducted study can be used to analyze the relationship between the dynamics of the magnetic-abrasive mass and the roughness of the machined surface. The required quality was achieved on those areas of the complex contour surface where the dynamics of the magnetic-abrasive mass was higher.

**Key words:** magnetic abrasive finishing, aluminium alloys, quality control, surface roughness, machining of aluminium alloys, finishing, working gap, complex contour surface.

### References

1. 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.
2. Litvinenko V. S., Dvoynikov M. V., Trushko V. L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022. Vol. 32, Iss. 1. pp. 113–119. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.09.010.
3. Alattar A. L., Bazhin V. Y. Al – Cu – B<sub>4</sub>C composite materials for the production of high-strength billets. *Metallurgist*. 2020. Vol. 64. P. 566–573.
4. Yamnikov A. S., Safarova L. L. Regularities of changing the dimensions of the main bore of the cylinder of TMZ-450D diesel engine during the technological process. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 248. pp. 319–326. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.16.
5. Volkova E. I., Sheler P. R. New linear technology: Near net size casting. *Zapiski Gornogo instituta*. 2005. Vol. 165. pp. 46–48.
6. Ahmad S., Singari R. M., Mishra R. S. Development of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> based magnetic abrasive by sintering method and its performance on Ti – 6Al – 4V during magnetic abrasive finishing. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 2021. Vol. 99, Iss. 2. pp. 94–101. DOI: 10.1080/00202967.2021.1865644.
7. Natsume M., Shinmura T. Study of magnetic abrasive machining by use of work vibration system (Characteristics of plane finishing and application to the inside finishing of groove). *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Series C*. 1998. Vol. 64, Iss. 627. pp. 4447–4452. DOI: 10.1299/kikaic.64.4447.
8. Bezyazychniy V. F., Szczerek M., Pervov M. L., Timofeev M. V., Prokofiev M. A. The study of the effect of temperature on the ability of metals to accumulate energy during their plastic deformation. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. pp. 55–59. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.55.

9. Sanin S. N., Pelipenko N. A. Innovative technology of large-size products manufacture. *Journal of Mining Institute*. 2018. Vol. 230. pp. 185–189. DOI: 10.25515/pmi.2018.2.185.
10. Yungmeister D. A., Sudarikov S. M., Kireev K. A. Feasibility of type of deep-water technologies for the extraction of marine ferro-manganese nodules. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. pp. 88–95. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.88.
11. Singh D. K., Jain V. K., Raghuram V. On the performance analysis of flexible magnetic abrasive brush. *Machining Science and Technology: An International Journal*. 2005. Vol. 9, Iss. 4. pp. 601–619. DOI: 10.1080/10910340500398217.
12. 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.
13. Pryakhin E. I., Sharapova D. M. Understanding the structure and properties of the heat affected zone in welds and model specimens of high-strength low-alloy steels after simulated heat cycles. *CIS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 19. pp. 60–65. DOI: 10.17580/cisr.2020.01.12.
14. Vasiliev A. S., Goncharov A. A. Special strategy of treatment of difficulty-profile conical screw surfaces of single-screw compressors working bodies. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. pp. 60–64.
15. Zhu P., Zhang G., Du, J., Jiang L., Zhang P., Cui Y. 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.
16. Kumar V., Sharma R., Dhakar K., Singla Y. K., Verma K. 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.
17. Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinkin S. Y. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 242. pp. 228–233. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.228.
18. Maksarov V. V., Popov M. A., Zakharova V. P. Influence of magnetic-abrasive machining parameters on ceramic cutting tools for technological quality assurance of precision products from cold-resistant steels. *Chernye Metally*. 2023. No. 1. pp. 67–73. DOI: 10.17580/chm.2023.01.10.
19. Bolobov V. I., Popov G. G. Methodology for testing pipeline steels for resistance to grooving corrosion. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 252. pp. 854–860. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.7.
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. 1561. DOI: 10.3390/pr9091561.
21. Cui T., Zhang G., Cui Y., Jiang, L. et al. Effect of atomizing rapid solidification spherical abrasive finishing on the surface quality of copper-nickel alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2021. Vol. 235, Iss. 12. pp. 2004–2014. DOI: 10.1177/09544054211007993.
22. Maksarov V. V., Olt J., Keksin A. I., Shcheglova R. A. The use of composite powders in the process of magnetic-abrasive finishing of taps to improve the quality of threads in articles made of corrosion-resistant steels. *Chernye Metally*. 2022. No. 2. pp. 49–55. DOI: 10.17580/chm.2022.02.09.
23. 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.
24. Nahy Ali, Kadhum Ali. Optimizing the micro-hardness of a surface by magnetic abrasive finishing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 870. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/870/1/012018.
25. Nam S. S., Kim J. S., Mun S. D. Magnetic abrasive finishing of beta-titanium wire using multiple transfer movement method. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, Iss. 19. 6729. DOI: 10.3390/app10196729.
26. Kumari C., Chak S. K., Vani V. V. Experimental investigations and optimization of machining parameters for Magneto-rheological Abrasive Honing process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2020. No. 1-9. DOI: 10.1080/10426914.2020.1779938.
27. Kuskov V. B., Ivanov V. V., Yushina T. I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing. *CIS Iron and Steel Review*. 2021. Vol. 21. pp. 4–8. DOI: 10.17580/cisr.2021.01.01.
28. 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.
29. Kumar M., Kumar V., Kumar A., Yadav H. N. S., Das M. 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.
30. 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.



31. Heng L., Kim J. S., Tu J.-F., Mun S. D. Fabrication of precision meso-scale diameter ZrO<sub>2</sub> ceramic bars using new magnetic pole designs in ultra-precision magnetic abrasive finishing. *Ceramics International*. 2020. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.04.02.  
 32. Hryniewicz T., Rokosz K., Filippi M. Biomaterial studies on AISI 316L stainless steel after magneto-electropolishing. *Materials*. 2009. Vol. 2, Iss. 1. pp. 129–145. DOI: 10.3390/ma2010129.  
 33. 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.  
 34. 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. 153. DOI: 10.1007/s40735-021-00587-4.  
 35. Keksin A. I., Filipenko I. A. Oil and gas sector products cold working process. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019*. 2020. Vol. 1. pp. 400–405. DOI: 10.1201/9781003014577-50.

## Оценка состояния монет: современные методы исследования и создание цифровой базы данных

УДК 336.746.13



**В. Ю. Бажин,**  
заведующий кафедрой металлургии,  
профессор,  
докт. техн. наук,  
эл. почта: bazhin\_vyu@pers.spmi.ru



**Д. В. Горлёнков,**  
доцент,  
канд. техн. наук



**А. П. Суслов,**  
проректор по эксплуатации и развитию  
имущественного комплекса,  
канд. техн. наук



**О. А. Горшкова,**  
студент 4 курса, факультета переработки  
минерального сырья

Санкт-Петербургский горный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

### Введение

Современные вопросы, связанные с цифровизацией, сопряжены с многими направлениями в науке, а также с решением задач в различных отраслях промышленности, в том числе и металлургии [1]. Развитие монетного дела тесно связано с обеспечением сырьем и созданием базы данных (БД), в том числе и по запасам благородных металлов. В связи с этим наряду с перспективными подходами, необходимо учитывать исторические традиции и опыт в области освоения и переработки серебряных руд [2] для производства монет.

Систематизация давно остается одной из основных задач нумизматики. В России существуют системы оценки состояния монет через каталоги по Биткину, Ильину, Петрову, Гиллю, Узденикову, Юсупову, Семенову,

Рассмотрены вопросы цифровизации в монетном деле и критерии оценки сохранности на примере николаевских серебряных рублей. Систематизация в виде каталогов всегда была необходимым условием в монетном деле. Концепция оценки сохранности монет менялась в течение всего исторического периода их коллекционирования. Можно выделить анализ по сохранности, износу, редкости и внешнему состоянию. В качестве объекта исследования выступали николаевские серебряные монеты, произведенные на Санкт-Петербургском и Брюссельском монетных дворах большими тиражами при участии выпускников Горного института, минцмейстеров серебряного и золотого переделов. Рассмотрены некоторые особенности пробирного анализа монет. Более масштабной и объективной для создания реальной цифровой платформы в нумизматике является оценка состояния металлического изделия с учетом данных, полученных на современных приборах, с последующей обработкой результатов моделированием с помощью специально разработанных программных пакетов. Электронные каталоги, дополненные новыми данными по коэффициенту износа, могут быть первой ступенью систематизации монетного дела в рамках цифровой платформы. Исследование серебряных монет проводили при помощи высокотехнологичного оборудования нескольких научных центров Санкт-Петербургского горного университета. Статья посвящена 250-летию Горного университета — первому техническому учебному заведению России, и лучшим его выпускникам, мастерам монетного дела.

**Ключевые слова:** цифровая платформа, серебряный рубль, монетное дело, сохранность, нумизматика, износ, аверс, реверс, коррозия, сканирующая микроскопия.

**DOI:** 10.17580/tsm.2023.04.14

Казакову, но чаще всего применяют международную шкалу доктора Шелдона [3–6].

За прошедшие годы было предпринято много попыток перевода информации по монетному делу в электронные варианты. Так, в 2005 г. создан «Электронный нумизматический каталог» с учетом работ В. В. Биткина [4], но он в основном ориентирован на аукционы и торги. Переизданы фундаментальные труды В. В. Узденикова [7], которые выступают как информационный ресурс для создания текущих ежегодных каталогов «Конрос» [8–10].

В современных российских каталогах, как правило, приведена упрощенная схема оценки, характеризующая состояние монет [3]. Она сводится к личной оценке каждого ученого. Ее применение позволяет оперативно определить стоимость монеты в зависимости