

УДК 621.793.74

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-15-23

Получение сферического магнитного абразива методом плазменного распыления в воду

Р. И. Ахметсагиров, кандидат технических наук, доцент, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

Магнитный абразив, используемый для внутренней отделки медицинских капиллярных трубок, предотвращающий накопление загрязнений и неравномерный поток транспортируемой жидкости, представляет собой композитную частицу, состоящую из магнитной основы (ферромагнитный порошок Fe_3O_4) и абразива Al_2O_3 . Неравномерность формы магнитного абразива, вызванная процессом механического дробления, приводит к неравномерной глубине резания абразива, оставляет задиры на поверхности и снижает качества шероховатости поверхности обрабатываемых изделий. Капиллярные трубки нашли широкое применение в медицинском, электрическом и химическом оборудовании. Эти трубки должны иметь гладко обработанные внутренние поверхности. Уменьшение внутреннего диаметра капилляра и увеличение его длины усложняют процесс обработки внутренней поверхности. Для улучшения качества магнитной абразивной обработки в данном исследовании предлагается получение сферического магнитного абразива на основе ферромагнитного порошка Fe_3O_4 , на поверхности которого наносится абразив Al_2O_3 с помощью плазменного распыления в воду. В статье рассматривается, во-первых, возможность плазменного распыления в воду для придания существующему магнитному абразиву сферической формы, и предлагаются условия, необходимые для получения сферического магнитного абразива; во-вторых, изучается создание нового сферического магнитного абразива, изготовленного из отдельных частиц, – ферромагнитного порошка Fe_3O_4 и абразива Al_2O_3 , который располагается на внешней поверхности магнитного абразива. Оценка качества обрабатываемой поверхности капиллярных трубок из нержавеющей стали 12X18H10T в ходе экспериментов показывает их применимость для магнитно-абразивной отделки. В результате исследования описан метод изготовления сферического магнитного абразива, режущие кромки абразива Al_2O_3 которого располагаются на внешней поверхности магнитного абразива, способного генерировать большую магнитную силу в сравнении с другими абразивами, полученными иными способами. Полученный сферический магнитный абразив, абразивные частицы Al_2O_3 которого диаметром в среднем 4 мкм, расположены поверх частиц ферромагнитного порошка Fe_3O_4 размером 75 мкм, имеет большую эффективность обработки капиллярных трубок из нержавеющей стали 12X18H10T в сравнении с магнитными абразивами, полученными иными способами.

Ключевые слова: магнитный абразив, металлические порошки, плазменное распыление.

Введение

Электрохимическое полирование – одна из существующих технологий обработки сложных поверхностей металлов. Внутри трубки, не задевая ее стенок, помещают электрод толщиной менее 1 мм, полость заполняют электропроводящим материалом, в качестве которого используются гранулы из анионитов, пропитанных электролитом. Далее путем их перемещения методом пневмотранспортировки создается избыточное давление на одном из входов во внутреннюю полость трубки. Принудительное движение гранул в прямом и противоположном направлениях через внутреннюю полость трубки путем подачи электрического потенциала и вибрация позволяют обеспечить равномерную обработку всей внутренней поверхности трубки [1]. Недостатками известного способа являются низкая точность геометрической

формы, размеров и невысокая чистота обрабатываемой поверхности при обработке внутреннего канала по всей длине капиллярной трубки. Таким образом, для обеспечения однородности шероховатости обрабатываемой внутренней поверхности трубок по всей длине разработка новой технологии является крайне востребованной.

Внутренняя магнитно-абразивная обработка, при которой магнитный абразив удаляет материал под действием магнитного поля, применяется для обработки труднодоступных поверхностей, что невозможно было сделать существующим методом [2]. Магнитный абразив представляет собой композитную частицу, состоящую из частиц ферромагнитного порошка Fe_3O_4 и абразива Al_2O_3 , и в настоящее время является наиболее доступным магнитным абразивом. Композитный материал изготавливается

термитным способом с использованием алюминиевого порошка и порошка оксида железа. Затем слиток механически измельчается и просеивается для изготовления магнитного абразива. Частицы Al_2O_3 располагаются как внутри, так и снаружи полученного магнитного абразива. Магнитный абразив при практическом использовании имеет средний диаметр 80 мкм, а содержащиеся в нем зерна абразива Al_2O_3 – меньше 10 мкм. Неравномерность формы магнитного абразива, полученного способом механического дробления, приводит к неравномерной глубине резания, оставляет задиры на поверхности и снижает качество шероховатости поверхности обрабатываемых изделий. Более того, неравномерность формы магнитного абразива вызывает трудности при введении его внутрь капиллярной трубки с внутренним диаметром менее 0,4 мм. Данные проблемы с магнитным абразивом, полученным существующим способом дробления, привели к снижению качества и производительности финишной обработки.

Способы получения магнитного абразива можно разделить на три группы: 1) механические смеси абразивных и магнитных порошков; 2) композиты; 3) литые материалы. Механические смеси включают в себя покрытые абразивом магнитные порошки [3–5]. Этот способ дает широкий спектр размеров магнитного абразива. Однако абразивные зерна могут отделиться от магнитных частиц; например, абразивный слой изнашивается в процессе обработки, что влияет на ее качество. Производство композитных абразивов предполагает спекание смеси магнитных и абразивных порошков с последующим дроблением и измельчением полученных материалов [6–8]. Литые абразивы изготавливаются методом дробления струи (распыления) расплава, содержащих железо, углерод, некоторые карбидообразующие элементы и другие легирующие добавки, на мельчайшие капли под воздействием жидкостного либо газового потока [9–11]. Только процесс распыления расплавов позволяет производить магнитные абразивы сферической формы [12]. Однако производительность получения абразива сильно зависит от механических свойств легирующих добавок. Теоретически возможно изготавливать магнитные абразивы путем распыления расплава, однако абразив плохо плавится, что сильно влияет на степень его дисперсии в сплаве. Это приводит к нерациональности изготовления сферического магнитного абразива путем распыления расплава.

Плазменное распыление – это тип термического распыления, группа процессов, в которых металлические и неметаллические материалы наносятся в расплавленном или полурасплавленном состоянии на подготовленную подложку. Применение данной технологии для изготовления сферических композитных порошков на основе сплава Al с дисперсными мелкими частицами SiC показало, что дисперсия керамической добавки и размер композитного порошка зависят от состава порошковой смеси, подаваемой в плазменную горелку [13]. Более того, эта технология перспективна не только для Al_2O_3 , но и для использования разных абразивных материалов. В данной работе предлагается создание сферического магнитного абразива на основе ферромагнитного порошка Fe_3O_4 , на поверхность которого наносится абразив Al_2O_3 с помощью плазменного распыления в воду.

Цель исследования – получение сферического магнитного абразива с более высокой магнитной силой на основе ферромагнитного порошка Fe_3O_4 , на поверхность которого наносится абразив Al_2O_3 с помощью плазменного распыления в воду для повышения качества обрабатываемой поверхности капиллярных трубок из нержавеющей стали 12X18H10T.

Методика проведения эксперимента

На территории Российской Федерации имеются месторождения корунда и минералов, содержащих в чистом виде Al_2O_3 . Ферромагнитный порошок Fe_3O_4 можно получить разными способами: плазмодинамическим синтезом, электролизом с растворимым анодом, методом старения осадка $Fe(OH)_2$. Известные способы получения ферромагнитного порошка Fe_3O_4 отличаются сложностью и имеют низкую производительность [14]. В данном исследовании предлагается использовать ферромагнитный порошок Fe_3O_4 , полученный методом плазменной эрозии (*Факторович А. А., Галанина Е. К. Электрические разряды в электролитах // Электрохимическая обработка металлов. Кишинев, 1971. С. 122–130*). Метод плазменной эрозии – это когда между электролитическим электродом (техническая вода, раствор 5%-го $CuSO_4$, раствор 5%-го $NaCl$) и твердым электродом (Сталь 40) зажигают плазменный разряд. При этом устанавливается электрический ток $I = 0,7...2$ А, напряжение $U = 500...1500$ В при атмосферном давлении, межэлектродное расстояние $l = 3...10$ мм. При этом плотность тока на твердом электроде $j_s = 0,5...4$ А/см². После получения необходимого объема ферромагнитного порошка Fe_3O_4 его

собирают в сборную емкость и промывают этиловым спиртом. Избыток спирта удаляют, порошок сушат на воздухе. При атмосферном давлении, $j_s = 1,6 \text{ A/cm}^2$, $U = 1300 \text{ В}$ производительность порошка составляет 40 г/ч. Уменьшение диаметра электрода приводит к увеличению производительности производства порошка за счет повышения плотности тока на его торце. Таким образом, предлагаемый способ позволяет увеличить производительность получения порошка в 300 раз по сравнению с известными способами [15].

Экспериментальные исследования с помощью микроскопа типа МБС-9 показали, что частицы порошка имеют форму сферы, и диаметр их меняется в пределах 1...300 мк. В зависимости от режима и условий можно получить металлический порошок определенного диаметра. Исследования показали, что использование в качестве жидкого электрода технической воды позволяет упростить процесс, повысить производительность получения порошка, снизить его стоимость. Физически этот интересный результат объясняется повышением плотности тока на металлическом электроде под действием свойств жидкого электрода. Сферическая форма частиц ферромагнитного порошка Fe_3O_4 позво-

ляет в дальнейшем при получении магнитного абразива повысить качество формообразования сферического магнитного абразива [16–18].

На рисунке 1 показана принципиальная схема системы плазменного распыления, которая состоит из электродов, вакуумной камеры, устройства для подачи порошковой смеси, состоящей из частиц ферромагнитного порошка Fe_3O_4 и абразива Al_2O_3 . Газ плазменной дуги, например, газ аргон (Ar), подается в плазмотрон, катод которого изготовлен из вольфрама, а анодное сопло – из высокочистой бескислородной меди. При подаче постоянного тока на электроды и с помощью высокочастотного разряда дуга ионизирует газ, создавая термическую плазму. В плазменной горелке достигается температура 5000...10000 °С. Частицы порошка, введенные в плазменную горелку, мгновенно расплавляются, образуя капли, которые после попадания в емкость с водой кристаллизируются и принимают сферическую форму магнитного абразива. Сферический магнитный абразив собирается на дне емкости с водой. Максимальная мощность дуги составляет 20 кВт и 500 А, расход плазмообразующего газа – 15...20 л/мин; охлаждающая вода вокруг электродов подается под давлением 1 МПа со скоростью 2,5...3 л/мин.

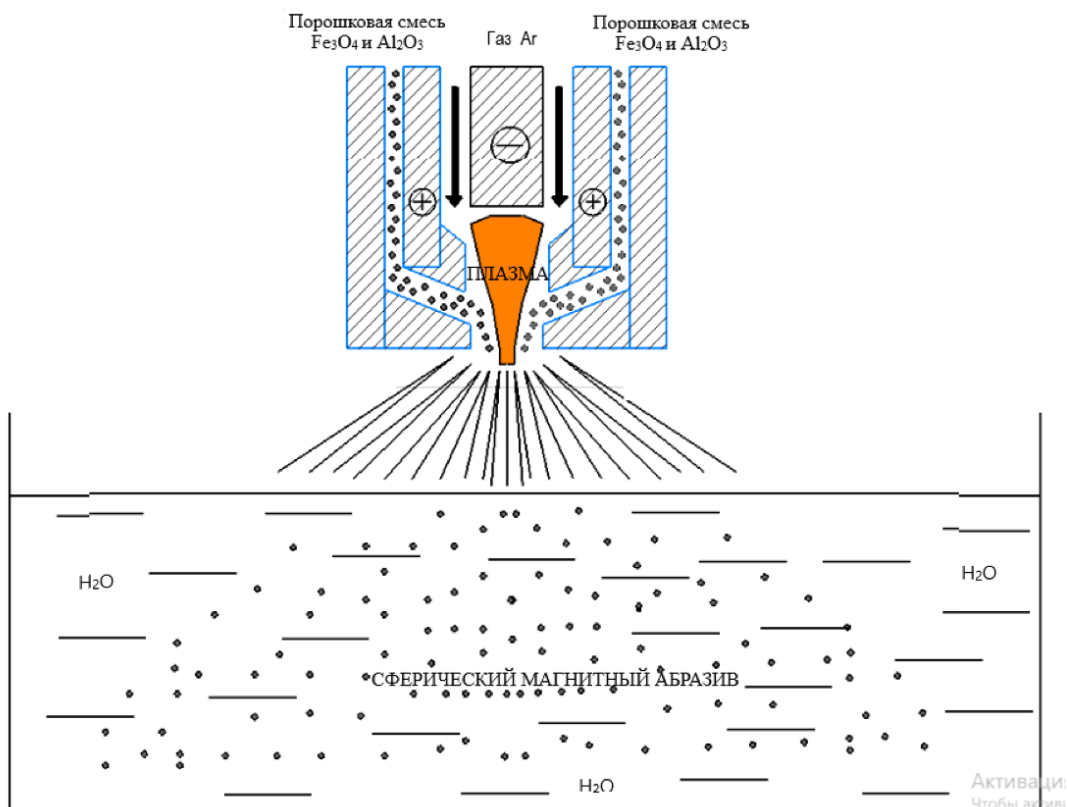


Рис. 1. Принципиальная схема плазменного распыления

Fig. 1. Schematic diagram of plasma spraying

При плазменном распылении свойства плазмообразующего газа в значительной степени влияют на термические характеристики плазменной струи. Плазменное распыление выполнялось с использованием газа аргона (Ar). Теплопроводность аргона при температуре 300 К составляет 0,0177 Вт/(м·К). Скорость подачи порошковой смеси в горелку составляла 6 г/мин.

На рисунке 2 показаны микрофотографии магнитных абразивов, полученных методом плазменного распыления, сделанные с помощью сканирующего электронного микроскопа. Порошковая смесь, состоящая из частиц ферромагнитного порошка Fe_3O_4 и абразива Al_2O_3 , имеет частицы неправильной формы. При разной силе тока – от 300 до 490 А – частицы маг-

нитного абразива имеют разные формы. Температуры плавления железа и оксида алюминия составляют 1535 и 2020 °С соответственно, теплопроводность железа и оксида алюминия – 34 Вт/(м·К) при 700 °С и 7 Вт/(м·К) при 800 °С соответственно. Поскольку частицы Al_2O_3 хаотично расположены в порошковой смеси, возникает проблема с ее плавлением. Использование плазмообразующего газа Ar и высокой силы тока 490 А позволило достичь температуры, оптимальной для качественного плавления. Плазменная пламя с более высоким током плазмы сильнее расплавил порошковую смесь, что привело к образованию большего количества сфероидизированных магнитных абразивных частиц.

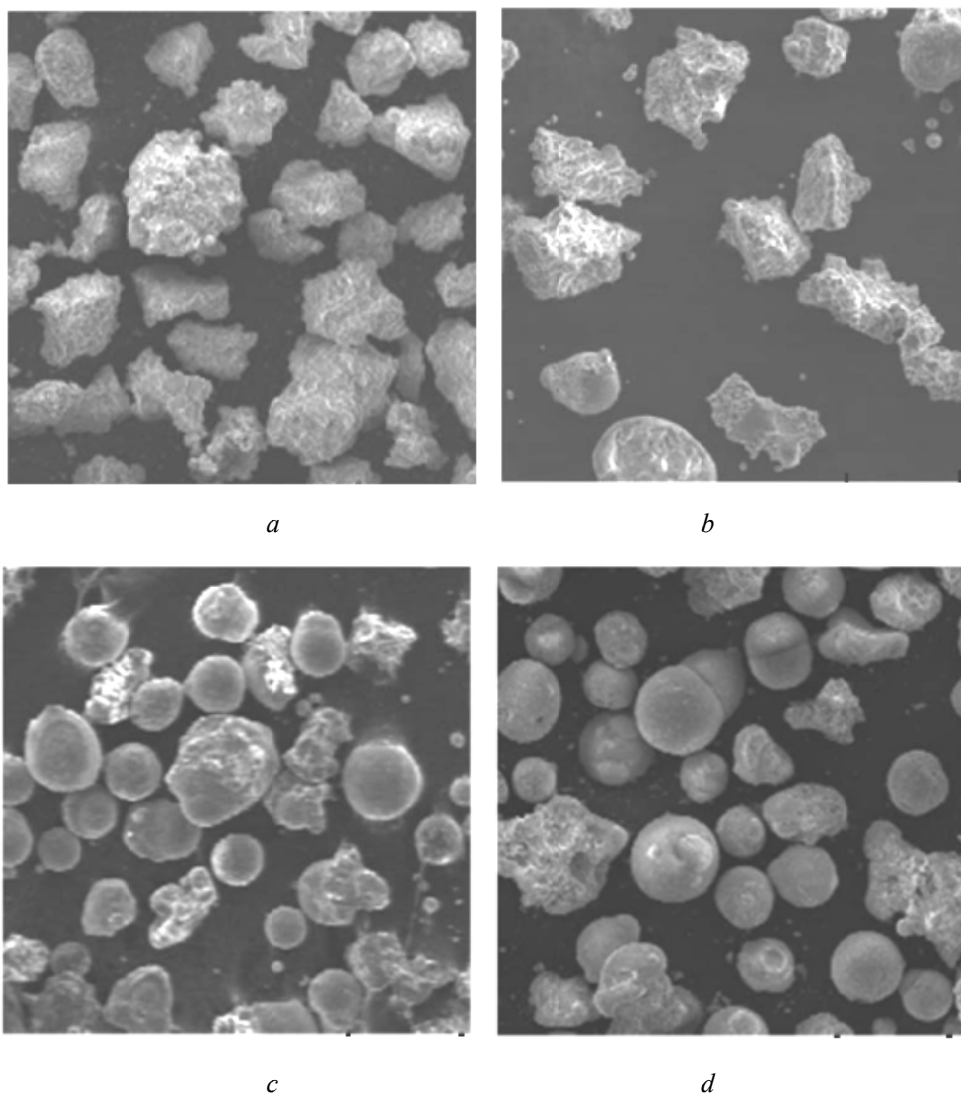


Рис. 2. Микрофотографии магнитных абразивов, полученных плазменным распылением при различных температурах плазменной струи: *a* – порошковая смесь до плазменного распыления; *b* – после использования Ar при силе тока 300 А; *c* – после использования Ar при силе тока 400 А; *d* – после использования Ar при силе тока 490 А

Fig. 2. Micrographs of magnetic abrasives obtained by plasma spraying at various plasma jet temperatures: *a* – powder mixture before plasma spraying; *b* – after using Ar at a current of 300 А; *c* – after using Ar at a current of 400 А; *d* – after using Ar at a current of 490 А

В процессе магнитно-абразивной обработки магнитная сила, действующая на магнитный абразив, влияет на производительность обработки и динамику движения частиц магнитного абразива [19–21]. Таким образом, магнитная сила является важным параметром, контролирующим производительность обработки. Сравнивались силы, действующие на каждый из магнитных абразивов в одном и том же магнит-

ном поле [22]. Определение магнитной силы проводилось с помощью магнитного материала NdFeB (неодим-железо-бор). Магнитная сила (Φ , мН) определялась тензодатчиками. Магнитная сила, воздействующая на частицы магнитного абразива, составила 160 мТл. На рисунке 3 показана связь между магнитной силой и частичками магнитного абразива, полученного при разных условиях.

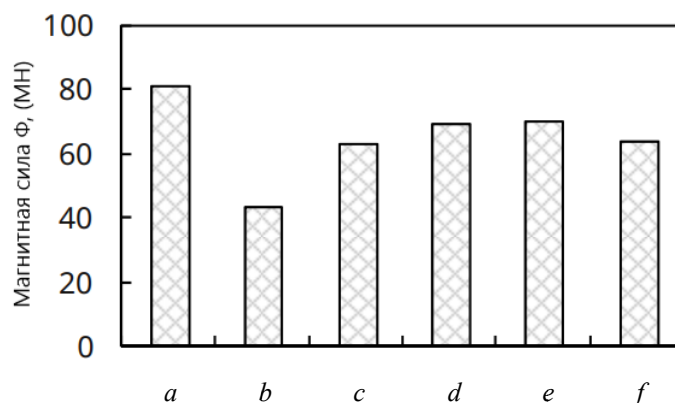


Рис. 3. Зависимость магнитной силы Φ для разных исследуемых материалов: *a* – частицы ферромагнитного порошка Fe_3O_4 ; *b* – частицы порошковой смеси, состоящей из частиц ферромагнитного порошка Fe_3O_4 и абразива Al_2O_3 ; *c* – частицы магнитного абразива, полученного плазменным распылением при силе тока 300 А; *d* – частицы магнитного абразива, полученного плазменным распылением при силе тока 490 А, диаметром 32 мкм; *e* – частицы магнитного абразива, полученного плазменным распылением при силе тока 490 А, без просеивания; *f* – частицы магнитного абразива, полученного плазменным распылением при силе тока 400 А

Fig. 3. Dependence of the magnetic force F for different materials under study: *a* – particles of ferromagnetic powder Fe_3O_4 ; *b* – particles of a powder mixture consisting of particles of ferromagnetic powder Fe_3O_4 and abrasive Al_2O_3 ; *c* – particles of magnetic abrasive obtained by plasma spraying at a current strength of 300 A; *d* – particles of magnetic abrasive obtained by plasma spraying at a current strength of 490 A, with a diameter of 32 microns; *e* – particles of magnetic abrasive obtained by plasma spraying at a current strength of 490 A, without sieving; *f* – particles of magnetic abrasive obtained by plasma spraying at a current strength of 400 A

Для сравнения были определены магнитная сила, действующая на частицы ферромагнитного порошка Fe_3O_4 со средним диаметром 75 мкм, и порошковую смесь, состоящую из частиц ферромагнитного порошка Fe_3O_4 диаметром 75 мкм и плотностью $7,8 \text{ г/см}^3$, покрытого слоем абразива Al_2O_3 , диаметром 4 мкм и плотностью $3,9 \text{ г/см}^3$. Частицы ферромагнитного порошка Fe_3O_4 показывают самую высокую магнитную силу из-за их высокой магнитной восприимчивости. Наоборот, порошковая смесь, состоящая из частиц ферромагнитного порошка Fe_3O_4 и абразива Al_2O_3 , показывает наименьшее значение из-за наличия в смеси частиц абразива Al_2O_3 . Все магнитные абразивы показали почти одинаковую магнитную силу. Небольшие отклонения, возможно, обусловлены наличием разного процентного соотношения частиц ферромагнитного порошка Fe_3O_4 и абразива Al_2O_3 в частицах магнитного абразива. Магнитный абразив, который просеяли под размер менее

32 мкм, показывает несколько более высокое значение, чем тот же абразив без просеивания. Соответственно, условия плазменного распыления оказывают незначительное влияние на магнитные свойства абразива.

Процесс обработки поверхности капиллярных трубок из нержавеющей стали 12Х18Н10Т магнитными абразивами, полученными предлагаемым способом плазменного распыления в воде, в связи с их сферической формой показывает несколько низкую скорость обработки в сравнении с существующими магнитными абразивами. Независимо от используемого магнитного абразива в результате обработки поверхности материала была достигнута одинаковая шероховатость, однако качество поверхности капиллярных трубок из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, обработанных магнитным абразивом сферической формы, более однородна и не имеет глубоких царапин. На рисунке 4 показана зависимость изменения шероховатости поверх-

ности и скорости съема материала от времени процесса магнитно-абразивной обработки.

Таким образом, предложенный метод изготовления сферического магнитного абразива с помощью плазменного распыления можно использовать для повышения производительности

обработки поверхности металлов сложной геометрической формы, в частности для внутренней обработки капиллярных трубок; экспериментально продемонстрирован способ получения магнитного абразива методом плазменного распыления.

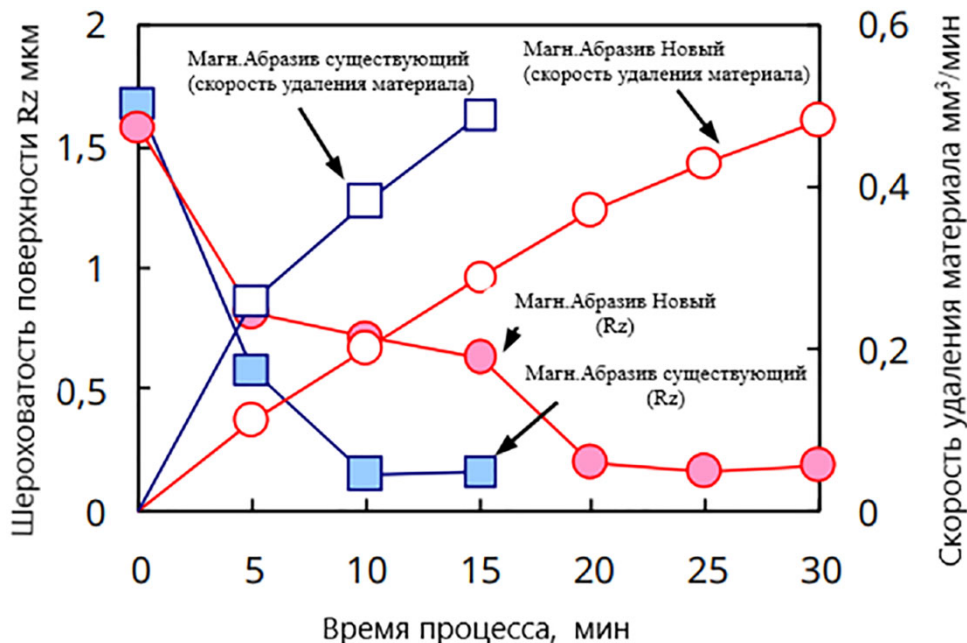


Рис. 4. Зависимость изменения шероховатости поверхности и скорости съема материала от времени процесса магнитно-абразивной обработки

Fig. 4. Dependence of changes in surface roughness and material removal rate on the time of the magnetic-abzastic treatment process

Выводы

1. Тепловые условия плазменного газа оказывают сильное влияние на форму магнитного абразива, но незначительное влияние на структуру материала.

2. Плазменное напыление может сфероидизировать полученный магнитный абразив и одновременно округлить режущие кромки абразива Al_2O_3 . В результате можно предотвратить образование редких глубоких царапин на обрабатываемой поверхности.

3. Процесс плазменного распыления позволяет получать сферический магнитный абразив, режущие кромки абразива Al_2O_3 которого располагаются на внешней поверхности магнитного абразива. Таким образом, этот магнитный абразив генерирует большую магнитную силу, чем магнитный абразив, полученный иными способами, абразивные частички которого располагаются как внутри, так и снаружи частицы магнитного абразива.

4. Полученный сферический магнитный абразив, абразивные частички Al_2O_3 которого

диаметром в среднем 4 мкм расположены поверх частиц ферромагнитного порошка Fe_3O_4 размером 75 мкм, имеет большую эффективность обработки капиллярных трубок из нержавеющей стали 12X18H10T в сравнении с магнитными абразивами, полученными иными способами.

Библиографические ссылки

1. Барон Ю. М. Технология абразивной обработки в магнитном поле. Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отделение, 1975. 128 с.
2. Комбинированный способ упрочнения и финишной абразивной обработки поверхностей деталей в магнитном поле / С. А. Чижик, Л. М. Акулович, М. Л. Хейфец, С. А. Клименко, В. И. Лавриненко, В. С. Майборода, А. И. Дикусар, С. Ивашку, Н. Казак // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. № 11. С. 509–519. DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-11-509-519
3. Порошковые материалы / С. Б. Ермаков, Б. С. Ермаков, Э. А. Сулейменов, А. В. Протопопов, М. А. Абдалиев. Алма-Ата : Гылым, 1991. 344 с.
4. Физические аспекты получения металлических порошков для гранульных и аддитивных технологий /

А. И. Рудской, К. Н. Волков, С. Ю. Кондратьев, Е. И. Старовойтенко, М. В. Зенина, А. М. Казберович // *Технология легких сплавов*. 2020. № 3. С. 4–10.

5. Сфероидизация железного порошка в СВЧ- и гибридном плазматронах / С. А. Ерёмин, В. Н. Аникин, Д. В. Кузнецов, И. А. Леонтьев, Ю. Д. Степанов, В. З. Дубинин, А. М. Колесникова, Ю. М. Яшнов // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2019. № 3. С. 4–12. DOI: 10.17073/1997-308X-2019-3-4-12

6. Чечуга А. О. Использование металлических порошков в аддитивном производстве // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 12. С. 457–459.

7. Афзалов Р. А., Сафронов Н. Н., Ахметсагиров Р. И. Рециклирование дисперсных отходов машиностроения в производстве литых штампов // *Вестник Казанского государственного технического университета имени А. Н. Туполева*. 2013. № 3. С. 39–44. EDN SMXDOT.

8. Рециклирование дисперсных отходов машиностроения в производстве литых штампов / Р. А. Афзалов, Н. Н. Сафронов, Р. И. Ахметсагиров, Л. Н. Дрогайлова // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17, № 12. С. 24–27. EDN SMLAXZ.

9. Получение металлических порошковых материалов распылением из проволок-анодов дуговой плазмой / А. В. Демчишин, М. А. Полещук, В. И. Зеленин, И. В. Доценко, И. М. Попович, В. М. Теллюк // *Сварщик в России*. 2019. № 2. С. 28–30

10. Батиенков Р. В., Морозова Т. А. Электроискровое плазменное спекание порошков тугоплавких металлов и их соединений (обзор) // *Металлург*. 2023. № 1. С. 64–73. DOI: 10.52351/00260827_2023_01_64

11. Князев А. Е., Мин П. Г., Востриков А. В. Исследование параметров распределения и технологических свойств порошков из стали 20x23n18, полученных методом плазменной плавки и центробежного распыления быстровращающихся литых заготовок // *Металлург*. 2021. № 9. С. 94–101. DOI: 10.52351/00260827_2021_09_94

12. Жаров М. В. Сравнительный анализ особенностей технологий получения качественного сферического порошка алюминид никеля NiAl // *Металлург*. 2022. № 11. С. 57–65. DOI: 10.52351/00260827_2022_11_57

13. Ермаков С. Б. Получение порошков для аддитивных машин методом плазменного распыления // *Научные технологии в машиностроении*. 2021. № 6 (120). С. 29–41. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-6-29-41

14. Применение нанопорошков железа и энергомеханической обработки исходной шихты для повышения плотности изделий, спеченных методом искрового плазменного спекания / Т. Х. Нгуен, Ю. В. Конюхов, В. М. Нгуен, А. С. Лилеев, В. Ф. Танг // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2021. № 4. С. 46–52.

15. *Akhmetisagirov R. I., Nasibullin R. T.* The control parameters of automatic control system of the process of

producing ferromagnetic powders by plasma erosion of a metallic anode 2016: 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 Proceedings, Chelyabinsk, May 19–20, 2016. Chelyabinsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. P. 7910946. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910946. EDN XNFKGB.

16. Получение сферических частиц металлов на установке с жидким анодом / Ю. С. Барышников, Р. О. Куракин, А. В. Чикиряка, Ф. А. Орлов, К. В. Твердохлебов, С. А. Леухин, М. И. Юрченков, С. А. Поняев // *Прикладная физика*. 2023. № 3. С. 18–24. DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-18-24

17. *Полещук В. С., Алёхов Ю. А., Пересадченко А. Н.* Влияние формы зерна композитного магнитно-абразивного порошка на производительность и качество магнитно-абразивной обработки // *Физика и техника высоких давлений*. 2024. № 1. С. 87–95.

18. Технологические особенности магнитно-абразивной обработки в условиях цифровых технологий / В. В. Максаров, А. И. Кексин, И. А. Филипенко, И. А. Бригаднов // *Металлообработка*. 2019. № 4 (112). С. 3–10.

19. Синтез и магнитные гистерезисные свойства порошкового изотропного магнитотвердого сплава Fe-30Cr-20Co, легированного алюминием / А. С. Устюхин, В. А. Зеленский, И. М. Милеев, М. И. Алымов, А. А. Ашмарин, А. Б. Анкудинов, К. В. Сергиенко // *Перспективные материалы*. 2023. № 11. С. 57–68. DOI: 10.30791/1028-978X-2023-11-57-68

20. Повышение производительности магнитно-абразивной обработки использованием диффузионно-легированных порошков / Ф. И. Пантелеенко, В. В. Максаров, Г. В. Петришин, Д. Д. Максимов // *СТИН*. 2023. № 3. С. 12–16.

21. *Полещук В. С., Алёхов Ю. А., Пересадченко А. Н.* Принципы создания модельных магнитно-абразивных порошков с прогнозируемыми свойствами // *Физика и техника высоких давлений*. 2024. № 2. С. 62–70.

22. *Максаров В. В., Клочков Д. А.* Особенности распределения магнитной индукции при магнитно-абразивной обработке синхронизаторов из конструкционной легированной стали // *Черные металлы*. 2023. № 7. С. 79–85. DOI: 10.17580/chm.2023.07.10

References

1. Baron Yu.M. (1975) [Technology of abrasive processing in a magnetic field]. Leningrad : Mashinostroenie Publishing, 128 p. (in Russ.).

2. Chizhik S.A., Akulovich L.M., Kheifets M.L., Klimentov S.A., Lavrinenko V.I., Mayboroda V.S., Dikusar A.I., Ivashku S., Kazak N. (2023) [Combined method of hardening and finishing abrasive surface treatment of parts in a magnetic field]. *Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija*, no. 11, pp. 509-519. DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-11-509-519 (in Russ.).

3. Ermakov S.B., Ermakov B.S., Suleimenov E.A., Protopopov A.V., Abdaliev M.A. (1991) [Powder materials]. Alma Ata: Gylym Publishing, 1991. 344 p.

4. Rudskoy A.I., Volkov K.N., Kondratiev S.Yu., Starovoitenko E.I., Zenina M.V., Kazberovich A.M. (2020) [Physical aspects of obtaining metal powders for granular and additive technologies]. *Tehnologija legkih splavov*, no. 3, pp. 4-10 (in Russ.).
5. Eremin S.A., Anikin V.N., Kuznetsov D.V., Leon-tiev I.A., Stepanov Yu.D., Dubinin V.Z., Kolesniko-va A.M., Yashnov Yu.M. (2019) [Spheroidization of iron powder in microwave and hybrid plasma torches]. *Izvestija vuzov. Poroshkovaja metallurgija i funkcional'-nye pokrytija*, no. 3, pp. 4-12. DOI: 10.17073/1997-308X-2019-3-4-12 (in Russ.).
6. Chechuga A.O. (2021) [The use of metal powders in additive manufacturing]. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, no. 12, pp.457-459 (in Russ.).
7. Afzalov R.A., Safronov N.N., Akhmetsagirov R.I. (2013) [Recycling of dispersed mechanical engineering waste in the production of cast dies]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta imeni A. N. Tupoleva*, no. 3, pp. 39-44. EDN SMXDOT (in Russ.).
8. Afzalov R.A., Safronov N.N., Akhmetsagirov R.I., Drogailova L.N. (2014) [Recycling of dispersed mechanical engineering waste in the production of cast dies]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, vol. 17, no. 12, pp. 24-27. EDN SMLAXZ (in Russ.).
9. Demchishin A.V., Poleshchuk M.A., Zelenin V.I., Dotsenko I.V., Popovich I.M., Tellyuk V.M. (2019) [Production of metal powder materials by spraying from anode wires with arc plasma]. *Svarshhik v Rossii*, no. 2, pp. 28-30 (in Russ.).
10. Batienvkov R.V., Morozova T.A. (2023) [Electric spark plasma sintering of powders of refractory metals and their compounds (review)]. *Metallurg*, no. 1, pp. 64-73. DOI: 10.52351/00260827_2023_01_64 (in Russ.).
11. Knyazev A.E., Min P.G., Vostrikov A.V. (2021) [Investigation of the distribution parameters and technological properties of powders made of 20x23h18 steel obtained by plasma melting and centrifugal spraying of rapidly rotating cast blanks]. *Metallurg*, no. 9, pp. 94-101. DOI: 10.52351/00260827_2021_09_94
12. Zharov M.V. (2022) [Comparative analysis of the technology features for producing high-quality spherical nickel aluminate powder NiAl]. *Metallurgist*, no.11, pp. 57-65. DOI: 10.52351/00260827_2022_11_57 (in Russ.).
13. Ermakov S.B. (2021) [Obtaining powders for additive machines by plasma spraying]. *Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii*, no. 6(120), pp. 29-41. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-6-29-41 (in Russ.).
14. Nguyen T.H., Konyukhov Yu.V., Nguyen V.M., Lileev A.S., Tang V.F. (2021) [Application of iron nanopowders and energy-mechanical treatment of the initial charge to increase the density of products sintered by spark plasma sintering]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*, no. 4, pp. 46-52 (in Russ.).
15. Akhmetsagirov R.I., Nasibullin R.T. (2016) The control parameters of automatic control system of the process of producing ferromagnetic powders by plasma erosion of a metallic anode 2016: 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 Proceedings, Chelyabinsk, May 19-20, 2016. Chelyabinsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 7910946. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910946. EDN XNFKGB.
16. Baryshnikov Yu.S., Kurakin R.O., Chikiryaka A.V., Orlov F.A., Tverdokhlebov K.V., Leukhin S.A., Yurchenkov M.I., Ponyaev S.A. (2023) [Obtaining spherical metal particles in a liquid anode installation]. *Prikladnaja fizika*, no. 3, pp. 18-24. DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-18-24 (in Russ.).
17. Polishchuk V.S., Alekhov Yu.A., Transplanchenko A.N. (2024) [The influence of the grain shape of composite magnetic abrasive powder on the productivity and quality of magnetic abrasive treatment]. *Fizika i tehnologija vysokih davlenij*, no. 1, pp. 87-95 (in Russ.).
18. Maksarov V.V., Keksin A.I., Filipenko I.A., Brigadnov I.A. (2019) [Technological features of magnetic abrasive processing in digital technology]. *Metalloobrabotka*, no. 4 (112), pp. 3-10 (in Russ.).
19. Ustyukhin A.S., Zelensky V.A., Milyaev I.M., Alymov M.I., Ashmarin A.A., Ankudinov A.B., Sergienko K.V. (2023) [Synthesis and magnetic hysteresis properties of aluminum-doped isotropic magnetic alloy Fe-30Cr-20CO]. *Perspektivnye materialy*, no. 11, pp. 57-68. DOI: 10.30791/1028-978X-2023-11-57-68 (in Russ.).
20. Panteleenko F.I., Maksarov V.V., Petrishin G.V., Maksimov D.D. (2023) [Improving the productivity of magnetic abrasive processing using diffusion-alloyed powders]. *STIN*, no. 3, pp. 12-16 (in Russ.).
21. Polishchuk V.S., Alekhov Yu.A., Transplanchenko A.N. (2024) [Principles of creating model magnetic abrasive powders with predictable properties]. *Fizika i tehnologija vysokih davlenij*, no. 2, pp. 62-70 (in Russ.).
22. Maksarov V.V., Klochkov D.A. (2023) [Features of the distribution of magnetic induction during magnetic abrasive treatment of synchronizers made of structural alloy steel]. *Chernye metally*, no. 7, pp. 79-85. DOI: 10.17580/chm.2023.07.10 (in Russ.).

Obtaining a Spherical Magnetic Abrasive by Plasma Spraying into Water

R.I. Akhmetsagirov, PhD in Engineering, Associate Professor, Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

A magnetic abrasive, used for medical capillary tube interior finishing, preventing accumulation of impurities and uneven flow of the transported liquid, is a composite particle consisting of a magnetic base (ferromagnetic powder Fe₃O₄) and an abrasive Al₂O₃. Non-uniform shape of the magnetic abrasive caused by the process of mechanical

crushing results in abrasive non-uniform cutting depth, leaves scuff marks on the surface and reduces the surface roughness of the processed products. Moreover, non-uniform shape of the magnetic abrasive causes difficulties when introducing it into a capillary tube. Capillary tubes are widely used in medical, electrical and chemical equipment. These tubes must have smooth machined inner surfaces to prevent the accumulation of contaminants and uneven flow of the transported liquid. Internal diameter reduction and length increase of a capillary complicates inner surface machining. To improve the quality of magnetic abrasive machining, this study proposes the production of a spherical magnetic abrasive based on ferromagnetic powder Fe_3O_4 with Al_2O_3 abrasive on the surface being applied by plasma spraying into water. The article considers: firstly, the possibility of plasma spraying into water to give the existing magnetic abrasive a more spherical shape and suggests the conditions necessary to obtain a spherical magnetic abrasive; secondly, it studies the creation of a new spherical magnetic abrasive made of individual particles: ferromagnetic powder Fe_3O_4 and abrasive Al_2O_3 , located on the outer surface of the magnetic abrasive. Quality evaluation of the machined capillary tube surface made of stainless steel SUS304 during experiments shows the applicability for magnetic abrasive finishing. As a result of the study, a method for manufacturing a spherical magnetic abrasive is described, the cutting edges of an Al_2O_3 abrasive located on the magnetic abrasive outer surface capable of generating a large magnetic force, in comparison with other abrasives obtained by other methods. The resulting spherical magnetic abrasive, whose Al_2O_3 abrasive particles with an average diameter of 4 microns are located on top of 75 microns of ferromagnetic Fe_3O_4 powder, has a greater processing efficiency of stainless steel SUS304 capillary tubes in comparison with magnetic abrasives obtained by other methods.

Keywords: magnetic abrasive, metal powders, plasma spraying.

Получено 09.01.2025

Образец цитирования

Ахметсагиров Р. И. Получение сферического магнитного абразива методом плазменного распыления в воду // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 1. С. 15–23. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-15-23

For Citation

Akhmetsagirov R.I. (2025) [Obtaining a Spherical Magnetic Abrasive by Plasma Spraying into Water]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 1, pp. 15-23 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-15-23