

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ  
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL  
AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING**

Научная статья

УДК 004.422.83

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-23-31

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ  
ПОЛИРОВАЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ  
АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ**

**Шумячер Вячеслав Михайлович<sup>1</sup>, Худолей Андрей Леонидович<sup>2</sup>,  
Крюков Сергей Анатольевич<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

\*для корреспонденции: vms22@yandex.ru

**Аннотация.**

Проблема совершенствования технологии изготовления кварцевых кристаллических элементов приобретает важное значение в связи с ростом объемов выпуска и номенклатуры устройств, изготавливаемых на предприятиях радиотехнической отрасли Российской Федерации.

В качестве пьезоэлектрических материалов помимо кварца могут применяться турмалин, виннокислый калий и виннокислый этилендиамин, различные керамики и многие другие моно- и поликристаллы. Однако ни один из них до сих пор не стал достаточно сильным конкурентом кварцу благодаря тому, что в кварце сочетаются многочисленные достоинства. К числу этих достоинств следует отнести и то, что кристаллы кварца являются почти идеально упругими телами, обладают ничтожным внутренним трением, большой механической и термической прочностью и встречаются в природе в виде чрезвычайно крупных образований (известны монокристаллы кварца весом свыше тонны). Кроме того, в настоящее время во многих странах мира развито промышленное производство синтетических кристаллов кварца, практически не уступающих по своему качеству природным. Одно из ведущих мест в этой отрасли принадлежит РФ.

В статье приведены результаты исследования свойств магнитореологических суспензий на производительность обработки за счет введения в их состав магнитных абразивных частиц, в результате чего повышаются абразивные свойства магнитореологических полировальных суспензий, что позволяет значительно расширить область применения магнитореологического полирования и использовать его не только для суперфинишной, но и для получистовой и чистовой видов обработок. Указанные процессы получистовой, чистовой и суперфинишной видов обработок можно реализовать на одной единице полировального оборудования.

**Информация о статье**

Поступила:

20 марта 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

29 мая 2024 г.

Принята к публикации:

29 мая 2024 г.

Опубликована:

28 июня 2024 г.

**Ключевые слова:**

магнитореологические свойства, суспензия, доводка, абразивные частицы, диспергирование, полирование

**Для цитирования:** Шумячер В.М., Худолей А.Л., Крюков С.А. Повышение эффективности магнитореологических полировальных суспензий за счет применения магнитных абразивных частиц // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 3 (163). С. 23-31. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-23-31, EDN: HJBWJA

### Введение

В настоящее время проблема повышения качества и объемов выпуска кварцевых кристаллических элементов (ККЭ) имеет важное народно-хозяйственное значение.

В качестве пьезоэлектрических материалов помимо кварца могут применяться турмалин, виннокислый калий и виннокислый этилендиамин, различные керамики (титанат бария, цирконат-титанат свинца и др.) и многие другие моно- и поликристаллы. Однако ни один из них до сих пор не стал достаточно сильным конкурентом кварцу благодаря тому, что в кварце сочетаются многочисленные достоинства. К числу этих достоинств следует отнести и то, что кристаллы кварца являются почти идеально упругими телами, обладают ничтожным внутренним трением, большой механической и термической прочностью и встречаются в природе в виде чрезвычайно крупных образований (известны монокристаллы кварца весом свыше тонны). Кроме того, в настоящее время во многих странах мира развито промышленное производство синтетических кристаллов кварца, практически не уступающих по своему качеству природным. Одно из ведущих мест в этой отрасли принадлежит нашей стране.

Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы изготавливаются в настоящее время в широком ассортименте и охватывают диапазон частот от нескольких сотен герц до нескольких сотен мегагерц. С помощью радиотехнических средств, применяемых для умножения и преобразования частоты, кварцевые резонаторы удается использовать для стабилизации электрических колебаний в еще более широком диапазоне, вплоть до сантиметровых волн. Применение пьезоэлектрических кристаллов для упомянутых целей привело к образованию особой отрасли науки и техники, базирующейся на достижениях кристаллографии и кристаллофизики, теории колебаний, технологии хрупких материалов и электровакуумных производств.

Данная проблема может быть решена путем совершенствования технологии изготовления ККЭ, применения новых технических решений и подходов. Качество ККЭ во многом предопределяется условиями, в которых происходит их формирование на стадиях механической обработки.

Основной фактор повышения качества кварцевых кристаллических элементов – это рациональная организация технологии их производства. Отклонения в основных параметрах кварцевого резонатора выявляются на заключительных стадиях изготовления резонатора и выражаются в отклонениях электрофизических показателей изделия от

требований нормативных условий. Выявление брака на этой стадии технологии делает невозможным исправление изделия, а это приводит к значительным материальным потерям.

При изготовлении кварцевых кристаллических элементов (ККЭ) широкое применение нашли операции доводки абразивными суспензиями, на которых формируются требуемые геометрические (точность формы) и микрогеометрические (шероховатость) параметры, однако при реализации этой технологии возникает ряд проблем: низкая производительность, необходимость применения специальной оснастки для каждого размера ККЭ и т.д. Прогрессивным шагом технологии доводки ККЭ является применение магнитореологических полировальных суспензий (МРПС), которые обеспечивают контролируемый съем материала с обрабатываемой поверхности и требуемую шероховатость до 1,4 ангстрема. Для расширения возможностей метода и реализации большого спектра технологий эффективно использовать магнитореологическое полирование на стадии располировки и полировки поверхности заготовки после тонкого шлифования и алмазного точения за счет применения магнитных абразивных частиц в виде полых сфер из  $Al_2O_3$  покрытых слоем никеля. Благодаря этому повышается «жесткость» МРПС, а это позволяет на одном оборудовании реализовывать черновую и чистовую обработку.

### Методы

Системные исследования процессов абразивной обработки магнитными частицами базировались на положениях теории трения и износа, теории резания, физико-химической механики материалов, физической и коллоидной химии, неравновесной термодинамики. Экспериментальные исследования проведены на аттестованном оборудовании, в том числе экспериментальной установке Полимаг (ИТМО, Минск), с использованием интерферометра ИКД-110 для измерения формы поверхности сферических оптических деталей диаметром до 100 мм. Диапазон радиусов измерения: вогнутые поверхности 10–200 мм, выпуклые поверхности 7–120 мм, крутизна измеряемой поверхности до  $20^\circ$ , разрешающая способность 1/300.

В качестве абразивной составляющей суспензии использовались оригинальные полые сферы из  $Al_2O_3$ , покрытые слоем никеля. Обработку вели на образцах из плавленого кварца, чтобы минимизировать роль химических явлений при МРП и получить данные, иллюстрирующие преимущественно абразивное воздействие МРПС с МАЧ на обрабатываемую

поверхность. Время полирования составляло 15 мин. Изучение топологии поверхности и измерение параметров шероховатости осуществляли на лазерном 3D профилометре MicroXAM 800 (KLA Tencor, США) в режиме PSI, при этом использовали объектив х5. Поле зрения составляло 0,825x1,12 мм. Достоверность результатов экспериментальных исследований была обеспечена современными методами измерений, аттестованной контрольно-измерительной аппаратурой и приборами.

#### Результаты исследований

Одним из перспективных методов повышения качества поверхности является магнитореологическое полирование, которое в том числе все чаще используют для обработки ККЭ.

Ранее проведенными исследованиями [1-4] процесса доводки кварцевых кристаллических элементов было показано, что производительность и качество обработки

зависит от структурно-механических характеристик абразивных суспензий.

Увеличение пластической вязкости при невысоких значениях предельного напряжения сдвига суспензии приводит к росту производительности. В связи с этим возникла необходимость проведения исследований суспензий с изменяемыми структурно-механическими свойствами. Таковыми являются магнито-реологические полировальные суспензии [5-12].

В работе для приготовления МРПС на водной основе использовали смесь из двух типов магнитных частиц: карбонильное радиотехническое железо Р-10 (ГОСТ 13610-79 «Железо карбонильное радиотехническое. Технические условия») со средним диаметром частиц 3,5 мкм и магнитные абразивные частицы (МАЧ) дисперсностью 40–70 мкм в виде полых корундовых микросфер ( $Al_2O_3$  – 99,7%) [13-20], декорированных никелем. Массовое

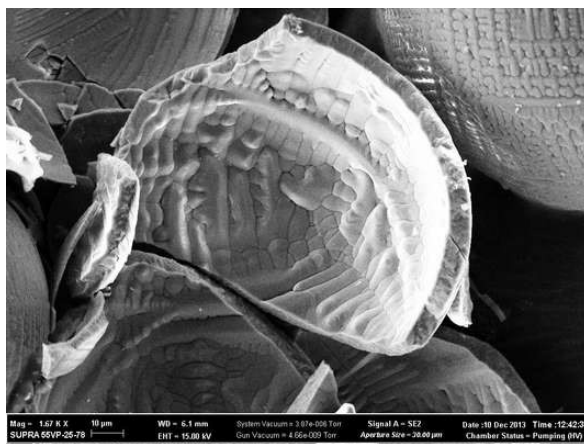
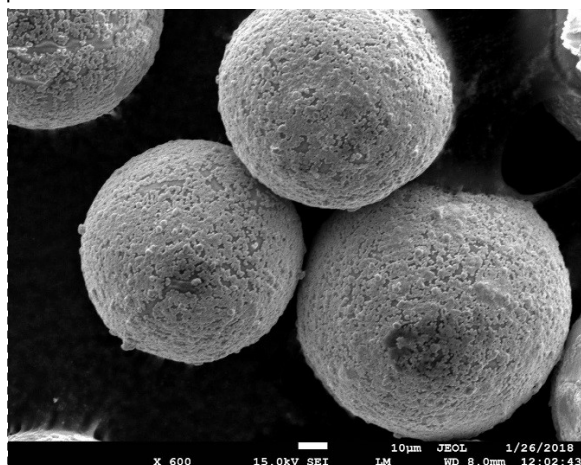
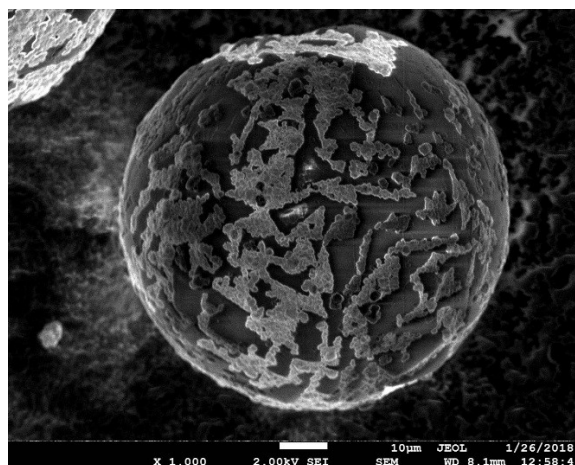


Рис. 1. Разрушенная микросфера  
Fig. 1. Destroyed microsphere



а



б

Рис. 2. СЭМ изображения полых сферических керамических частиц, декорированных никелем:  
а – сферы практически с полным покрытием поверхности; б – частично декорированная сфера  
Fig. 2. SEM images of hollow spherical ceramic particles decorated with nickel: a – spheres with almost complete surface coating; b – partially decorated sphere

соотношение частиц Р-10 и МАЧ составляло 1:19. Дисперсный абразив в полировальную суспензию не добавляли.

На Рис. 1 и 2 представлены изображения полых сферических керамических частиц, декорированных никелем, полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) фирмы JEOL (Япония). Полая корундовая микросфера имеет внутреннюю закрытую полость определенного размера, размер полости зависит от размера микросферы и толщины стенки. Прочность частицы абразивного зерна (плавленый электрокорунд) намного выше, чем прочность микросферы, поэтому режет материал в основном зерно абразива, а вскрывшаяся микросфера «мягко» подрезает образовавшиеся мелкие заусенцы и разрушается, образуя новые острые кромки. Таким образом вскрывшаяся микросфера самозатачивается (Рис. 1).

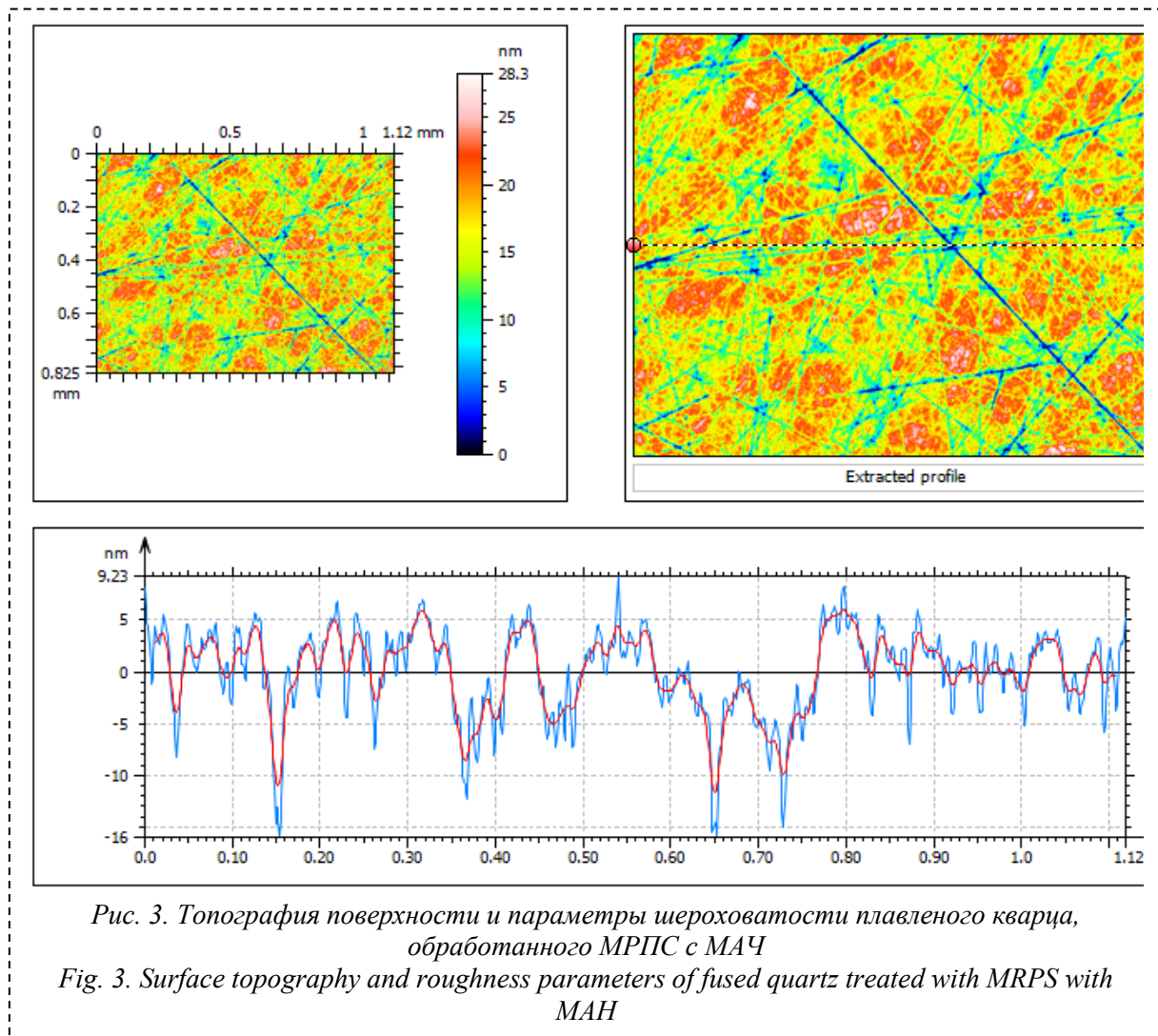
Для этих сфер характерна механическая прочность 40–120 МПа и теплопроводность 0,1–1,0 Вт/(м\*К).

В стандартных МРПС для МРП в качестве абразива используют частицы от 7 нм до 2 мкм.

Чаще всего это нано- и ультрадисперсные алмазы (40-100 нм) и оксид церия (1,0-2,0 мкм). Следует отметить, что на такие абразивные частицы не действуют магнитные силы и они находятся в незафиксированном состоянии в несущей жидкости и на них, преимущественно, оказывают механическое воздействие магнитные микрочастицы. Это приводит к тому, что кромки абразива не ориентированы, а сами абразивные зерна не жестко зафиксированы относительно обрабатываемой поверхности. Поэтому стандартные МРПС обладают слабовыраженным абразивным воздействием на обрабатываемую поверхность, что позволяет на практике достигать низкого уровня шероховатости – для плавленого кварца это  $R_a$  0,13 нм и  $R_q$  0,17 нм, однако такой процесс характеризуется очень малыми величинами съема материала. Результаты измерений представлены на Рис. 3.

### Обсуждение

При использовании МАЧ для формирования МРПС установлено, что в зоне полирования под воздействием сильного магнитного поля (0,3-0,4



Теслы) происходит перестройка внутренней структуры МРПС, выражающаяся в магнитной сегрегации частиц. При этом частицы карбонильного железа прилегают к несущей поверхности (например, к рабочему колесу) и формируют «полужесткий» полировальник, имеющий упорядоченную внутреннюю структуру в виде цепочек с направлением вдоль силовых линий магнитного поля. На поверхности «полужесткого» полировальника формируется слой, состоящий из МАЧ – «мягкий» полировальник, частицы которого также ориентируются в магнитном поле, однако силы магнитного взаимодействия между МАЧ значительно меньше, чем у частиц карбонильного железа. В результате при полировании МАЧ оказываются непосредственно в контакте с обрабатываемой поверхностью и участвуют в процессе абразивного съема. Это объясняет наличие разнонаправленных царапин на поверхности плавленного кварца глубиной до 16 нм (следы абразивного воздействия) с увеличением параметров шероховатости до  $R_z$  16,4 нм,  $R_a$  2,53 нм и  $R_q$  3,23 нм (Рис. 3), т.е. более чем на порядок по сравнению с традиционным МРП. Наличие слабомагнитных свойств у МАЧ позволят дополнительно управлять параметрами абразивного воздействия: фиксировать и ориентировать кромки абразивных частиц, что увеличивает скорость съема материала с обрабатываемой поверхности.

#### Выводы

Таким образом, повышение абразивных свойств магнито-реологических полировальных суспензий за счет применения магнитных абразивных частиц позволяет значительно расширить область применения магнито-реологического полирования и использовать его не только для суперфинишной, но и для получистовой и чистовой видов обработок с достижением шероховатости поверхности не хуже  $R_z$  0,05 мкм, которое широко используется в виде требования к качеству рабочих поверхностей традиционной оптических продукции и других прецизионных компонентов, причем указанные процессы получистовой, чистовой и суперфинишной видов обработок можно реализовать на одной единице полировального оборудования.

Реализация полученных результатов в производстве позволит решить проблему повышения качества и объемов выпуска кварцевых кристаллических элементов (ККЭ).

Проведение дальнейших исследований, раскрывающих физико-механическую сущность явлений, сопровождающих процесс доводки ККЭ абразивной суспензией, позволит разработать технологические принципы их создания для заданных показателей обработки.

#### Список литературы

1. Славина Е. В. Повышение эффективности доводки кварцевых кристаллических элементов путем управления структурно-механическими характеристиками абразивных суспензий // В сборнике: Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития. сборник материалов Всероссийской молодежной научной конференции. 2014. С. 394–398.
2. Шумячер В. М., Позднышева А. П., Волков М. П. Физико-химические свойства абразивных суспензий в процессе доводки кварцевых кристаллических элементов // В сборнике: Смазочно-охлаждающие жидкости в процессах абразивной обработки. сборник научных трудов. Ульяновск, 1992. С. 35–38.
3. Славина Е. В., Полянчиков Ю. Н. Повышение производительности доводки кварцевых кристаллических элементов путем управления процессом структурообразования в контакте притир – заготовка // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2011. № 25 (44). С. 178–182.
4. Славина Е. В. Повышение производительности доводки кварцевых кристаллических элементов путем управления процессом структурообразования в контакте «притир – заготовка» // В сборнике: Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сборник статей Международной научно-технической конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, Волжский институт строительства и технологий (филиал) Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета; под редакцией Шумячер В. М., 2012. С. 100–101.
5. Разработка технологии чистовой обработки деталей с базированием в среде реологических жидкостей /
6. Болдырев А. А. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Воронеж. гос. техн. ун-т. Воронеж, 2013.
7. Злотников Е. Г., Захарова В. П., Минин А. О. Технологическое обеспечение шероховатости прецизионных поверхностей на наноуровне методами финишной обработки // В сборнике: Нанозифика и Наноматериалы. Сборник научных трудов Международного семинара. 2020. С. 153–156.
8. Сандуляк Д. А., Сандуляк А. А., Полисмакова М. Н., Сандуляк А. В., Харин А. С., Соловьев И. А. Оценка критериальной объемной доли феррочастиц в порошке для контроля магнитных свойств отдельных частиц // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2023. № 2. С. 16–22.

9. Иванов П. А., Левко В. А., Литовка О. В., Сысоева Л. П. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком внутренней поверхности заготовок из латунных сплавов // Вестник МГТУ «Станкин». 2023. №1 (64). С. 114–124.

10. Окалан М., Ту Х., Уикс Н., Робиссон А., Гийо Д. Чувствительные к полю текучие среды Патент на изобретение RU 2439139 С2, 10.01.2012. Заявка № 2009139914/04 от 23.02.2009.

11. Кашевский С. Б., Худoley А. Л. Модель динамики магнитной суспензии в градиентном магнитном поле // В сборнике: 19-я международная плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. Сборник научных трудов. Иваново, 2020. С. 186–190.

12. Худoley А. Л., Колпащиков В. Л., Городкин Г. Р. Особенности магнитореологической обработки оптических изделий из высокочистых веществ // В книге: Высокочистые вещества и материалы получение, анализ, применение. Сборник тезисов XVI Всероссийской конференции и IX Школы молодых ученых, посвященные 100-летию академика Г. Г. Девярых. 2018. С. 176.

13. Дюжиков В. И., Баранов В. Н., Бурцев А. М. Способ шлифования кристаллических кварцевых элементов. Авторское свидетельство SU 1583263 А1, 07.08.1990. Заявка № 4398961 от 29.03.1988.

14. Сергеевичев А. В., Михайлова А. Е. Анализ процесса стружкообразования при шлифовании абразивными кругами из сферокорунда // В сборнике: Научно-техническая конференция по итогам научно-исследовательских

работ 2019 года. Сборник статей по материалам конференции. Отв. редактор Соколова В. А. 2020. С. 385–390. Абразивные материалы Справочник. Инженерный журнал. 2007. № 4 (121). С. 2–3.

15. Шумячер В. М., Крюков С. А., Байдакова Н. В., Безнебеева А. М., Ревзина Е. М. Абразивные материалы, инструменты, пасты, суспензии и их использование. Учебно-терминологический словарь. Санкт-Петербург, 2019.

16. Романенко А. М., Баштанов В. Г. Повышение производительности чистового шлифования // В сборнике: Современные тенденции развития науки и производства. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. Западно-Сибирский научный центр. Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2016. С. 155–157.

17. Носенко В. А., Носенко С. В. Технология шлифования металлов (4-е издание, стереотипное). Старый Оскол, 2022.

18. Овчинников А. И. Материалы для абразивного инструмента. Обзор Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2013. № 7. С. 41–68.

19. Гаршин А. П., Федотова С. М. Материаловедение в 3 т. Том 1. Абразивные материалы. Учебник / Сер. 11. Университеты России. (2-е изд., испр. и доп.) Москва, 2017.

20. Гаршин А. П., Федотова С. М. Материаловедение в 3 т. Том 3. Технология конструкционных материалов: абразивные инструменты. Учебник / Сер. 11. Университеты России. (2-е изд., испр. и доп.) Москва, 2017.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Шумячер Вячеслав Михайлович**, доктор техн. наук, профессор, Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 404120, Российская Федерация г. Волжский, Волгоградской обл., ул. Энгельса, 42А, e-mail: vms22@yandex.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1495-0691>

**Худoley Андрей Леонидович**, кандидат техн. наук, доцент, Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 220072, Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 15, e-mail: khudoley@hmti.ac.by, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0930-1785>

**Крюков Сергей Анатольевич**, доктор техн. наук, доцент, Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 404120, Российская Федерация г. Волжский, Волгоградской обл., ул. Энгельса, 42А, e-mail: sf-visteh@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9558-0452>

Заявленный вклад авторов:

Шумячер Вячеслав Михайлович – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы.

Худолей Андрей Леонидович – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы.

Крюков Сергей Анатольевич – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

### INCREASING THE EFFICIENCY OF MAGNETORHEOLOGICAL POLISHING SUSPENSIONS DUE TO THE USE OF MAGNETIC ABRASIVE PARTICLES

Vyacheslav M. Shumyacher <sup>1</sup>, Andrey L. Khudolei <sup>2</sup>,  
Sergey A. Kryukov <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University

<sup>2</sup>A.V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus

\*for correspondence: vms22@yandex.ru



#### Article info

Received:

20 March 2024

Accepted for publication:

29 May 2024

Accepted:

29 May 2024

Published:

28 June 2024

**Keywords:** magnetorheological properties, suspension, finishing, abrasive particles, dispersion, polishing

#### Abstract.

*The problem of improving the technology of manufacturing quartz crystal elements is becoming important due to the increase in the volume of production and the range of devices manufactured at enterprises of the radio engineering industry of the Russian Federation.*

*The article presents the results of a study of the properties of magnetorheological suspensions on processing performance due to the introduction of magnetic abrasive particles into their composition.*

*As a result, the abrasive properties of magnetorheological polishing suspensions increase, which makes it possible to significantly expand the scope of magnetorheological polishing and use it not only for superfine, but also for semi-finishing and finishing types of treatments. These processes of semi-finishing, finishing and superfine treatments can be implemented on one unit of polishing equipment.*

**For citation:** Shumyacher V.M., Khudolei A.L., Kryukov S.A. Increasing the efficiency of magnetorheological polishing suspensions due to the use of magnetic abrasive particles. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 3(163):23-31. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-23-31, EDN: HJBWJA

#### REFERENCES

1. Slavina E.V. Improving the efficiency of fine-tuning quartz crystal elements by controlling the structural and mechanical characteristics of abrasive suspensions. *In the collection: New materials and technologies: the state of the issue and development prospects. collection of materials of the All-Russian Youth Scientific Conference.* 2014. Pp. 394–398.
2. Shumyacher V.M., Pozdnysheva A.P., Volkov M.P. Physico-chemical properties of abrasive

suspensions in the process of fine-tuning quartz crystal elements. *In the collection: Lubricating and cooling liquids in the processes of abrasive processing. collection of scientific papers.* Ulyanovsk, 1992. Pp. 35–38.

3. Slavina E.V., Polyanchikov Yu.N. Increasing the productivity of fine-tuning quartz crystal elements by controlling the process of structure formation in contact lapping – billet. *Bulletin of the Volgograd State*

*University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture.* 2011; 25(44):178–182.

4. Slavina E.V. Improving the performance of fine-tuning quartz crystal elements by controlling the process of structure formation in the lapping - billet contact. *In the collection: Abrasive processing processes, abrasive tools and materials. Collection of articles of the International Scientific and Technical Conference.* Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Volga Institute of Construction and Technology (branch) Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering; edited by V.M. Shumyacher, 2012. Pp. 100–101.

5. Boldyrev A.A. Development of technology for finishing parts based in the medium of rheological fluids. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Voronezh State Technical University. Voronezh, 2013.

6. Zlotnikov E.G., Zakharova V.P., Minin A.O. Technological provision of roughness of precision surfaces at the nanoscale by finishing methods. *In the collection: Nanophysics and Nanomaterials. Collection of scientific papers of the International Seminar.* 2020. Pp. 153–156.

7. Sandulyak D.A., Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak A.V., Kharin A.S., Solovyov I.A. Evaluation of the criterion volume fraction of ferroparticles in a powder to control the magnetic properties of individual particles. *Devices and systems. Management, control, diagnostics.* 2023; 2:16–22.

8. Ivanov P.A., Levko V.A., Litovka O.V., Sysoeva L.P. Contact interactions during abrasive flow treatment of the inner surface of workpieces made of brass alloys. *Bulletin of MGTU "Stankin".* 2023; 1(64):114–124.

9. Okalan M., Tu H., Weeks N., Robisson A., Guillot D. Field-sensitive fluids. Patent for invention RU 2439139 C2, 01/10/2012. Application No. 2009139914/04 dated 02/23/2009.

10. Kashevsky S.B., Khudoley A.L. A model of the dynamics of a magnetic suspension in a gradient magnetic field. *In the collection: The 19th International Pless Scientific Conference on nanodisperse magnetic liquids. Collection of scientific papers.* Ivanovo, 2020. Pp. 186–190.

11. Khudoley A.L., Kolpashchikov V.L., Gorodkin G.R. Features of magnetorheological

processing of optical products made of high-purity substances. *In the book: High-purity substances and materials preparation, analysis, application. collection of abstracts of the XVI All-Russian Conference and the IX School of Young Scientists dedicated to the 100th anniversary of Academician G.G. Ninth.* 2018. P. 176.

12. Dyuzhikov V.I., Baranov V.N., Burtsev A.M. The method of grinding crystalline quartz elements. Copyright certificate SU 1583263 A1, 08/07/1990. Application No. 4398961 dated 03/29/1988.

13. Sergeevichev A.V., Mikhailova A.E. Analysis of the chip formation process during grinding with abrasive wheels made of spherocorundum. *In the collection: Scientific and technical conference on the results of scientific research in 2019. A collection of articles based on the conference materials.* Editor-in-chief V.A. Sokolova. 2020. Pp. 385–390.

14. Abrasive materials. Handbook. Engineering magazine. 2007; 4 (121);2–3.

15. Shumyacher V.M., Kryukov S.A., Baidakova N.V., Beznebeeva A.M., Revzina E.M. Abrasive materials, tools, pastes, suspensions and their use. *Educational and terminological dictionary.* St. Petersburg, 2019.

16. Romanenko A.M., Bashtanov V.G. Improving the performance of finishing grinding. *In the collection: Modern trends in the development of science and production. Collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference.* West Siberian Scientific Center. Kemerovo^ Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev; 2016. Pp. 155–157.

17. Nosenko V.A., Nosenko S.V. Metal grinding technology (4th edition, stereotypical) .Stary Oskol, 2022.

18. Ovchinnikov A.I. Materials for abrasive tools. Review. *Science and Education: scientific publication of the Bauman Moscow State Technical University.* 2013;7:41–68.

19. Garshin A.P., Fedotova S.M. Materials Science in 3 volumes. Volume 1. Abrasive materials. Textbook / Ser. 11. Universities of Russia (2nd ed., ispr. and additional). Moscow, 2017.

20. Garshin A.P., Fedotova S.M. Materials Science in 3 volumes. Volume 3. Technology of structural materials: abrasive tools. Textbook / Ser. 11. Universities of Russia (2nd ed., ispr. and additional). Moscow, 2017.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

**Vyacheslav M. Shumyacher**, Dr. Sc. in Engineering, Professor, Volga Polytechnic Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University", 404120, Russian Federation, Volzhsky, Volgograd region, 42A Engels Street, e-mail: vms22@yandex.ru

**Andrey L. Khudolei**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, A.V. Lykov Institute of Heat and Mass



---

Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, 15 P. Brovki str., Minsk, 220072, Republic of Belarus  
**Sergey A. Kryukov**, Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor, Volga Polytechnic Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University", 404120, Russian Federation, Volzhsky, Volgograd region, 42A Engels Street

*Contribution of the authors:*

Vyacheslav M. Shumyacher – setting a research problem; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study; writing text, collecting and analyzing data; conclusions.

Andrey L. Khudolei – setting a research problem; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study; writing text, collecting and analyzing data; conclusions.

Sergey A. Kryukov – setting a research problem; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study; writing text, collecting and analyzing data; conclusions.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

