

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРАНАТОВЫХ ПЕСКОВ НА ИХ АБРАЗИВНУЮ И РЕЖУЩУЮ СПОСОБНОСТИ

Г.Х. Султанова, Е.В. Гладких, К.С. Кравчук, В.В. Соловьев, А.С. Усеинов

Гульназ Хакимовна Султанова (ORCID 0000-0002-4770-5724)*, Екатерина Владимировна Гладких (ORCID 0000-0001-8273-3934)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

Московский физико-технический институт, Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация, 141701

E-mail: sultanova.gkh@phystech.edu *, ekat.gladkih@yandex.ru

Константин Сергеевич Кравчук (ORCID 0000-0002-9956-9939), Владимир Витальевич Соловьев (ORCID 0000-0002-4768-7087), Алексей Серверович Усеинов (ORCID 0000-0002-9937-0954)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: kskrav@gmail.com, vladimir.sol@bk.ru, useinov@mail.ru

В данной работе проведено исследование комплекса физико-механических свойств гранатового песка, производимого австралийской компанией GMA Garnet PTY Ltd., и двух опытных образцов гранатовых концентратов, производимых российской организацией ИМГРЭ, с различным содержанием минералов. Были проведены измерения значений таких характеристик как шероховатость, твердость, модуль упругости, прочность, абразивная и режущая способности, а также насыпная плотность. Проведено сравнение полученных данных с целью решения технических и экономических вопросов, связанных с добычей гранатовых песков и применением в конкретных видах обработки материалов. Поскольку абразивная и режущая способности считаются основными показателями качества абразивных гранатовых песков, на основании полученных результатов проведен анализ корреляции значений абразивной и режущей способностей с другими измеренными свойствами. Показано, что с учетом наличия примесей усредненная твердость всех трех образцов песка совпадает в пределах погрешности и составляет $(17,2 \pm 3,5)$ ГПа, модуль упругости составил (274 ± 43) ГПа. Величина шероховатости у всех трех образцов совпала в пределах погрешности. При этом полученные значения твердости отдельных гранатовых частиц сопоставимы с результатами исследований гранатовых частиц различных месторождений или производимых другими компаниями. Показано, что основными параметрами из исследованных, находящимися в прямой корреляционной связи с абразивной и режущей способностью, являются прочность и модуль упругости, а также процентное содержание частиц граната в смеси песка. Содержание примесных частиц с меньшей твердостью в исследованных песках нелинейно занижает прочность, абразивную и режущую способности.

Ключевые слова: гранат, абразивный песок, твердость, абразивная способность, режущая способность

Для цитирования:

Султанова Г.Х., Гладких Е.В., Кравчук К.С., Соловьев В.В., Усеинов А.С. Исследование влияния механических свойств и химического состава гранатовых песков на их абразивную и режущую способности. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 11. С. 34–40. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.6y.

For citation:

Sultanova G.Kh., Gladkikh E.V., Kravchuk K.S., Solovyev V.V., Useinov A.S. Study of the effect of mechanical properties and chemical composition of garnet sands on their abrasive and cutting abilities. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 11. P. 34–40. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.6y.

STUDY OF THE EFFECT OF MECHANICAL PROPERTIES AND CHEMICAL COMPOSITION OF GARNET SANDS ON THEIR ABRASIVE AND CUTTING ABILITIES

G.Kh. Sultanova, E.V. Gladkikh, K.S. Kravchuk, V.V. Solovyev, A.S. Useinov

Gulnaz Kh. Sultanova (ORCID 0000-0002-4770-5724)*, Ekaterina V. Gladkikh (ORCID 0000-0001-8273-3934)
Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Institutskiy Per., 9, Dolgoprudny, Moscow Reg., 141701, Russia

E-mail: sultanova.gkh@phystech.edu *, ekat.gladkikh@yandex.ru

Konstantin S. Kravchuk (ORCID 0000-0002-9956-9939), Vladimir V. Solovyev (ORCID 0000-0002-4768-7087), Alexey S. Useinov (ORCID 0000-0002-9937-0954)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

In this work the complex of physical and mechanical properties of garnet sand produced by the Australian company GMA Garnet PTY Ltd. and two prototypes of garnet concentrates produced by the Russian organization IMGRE with different mineral content was studied. The values of such characteristics as roughness, hardness, modulus of elasticity, strength, abrasive and cutting abilities, as well as bulk density were measured. A comparison of the obtained data was carried out in order to solve technical and economic issues related to the extraction of garnet sands and their use in specific types of material processing. Since abrasive and cutting ability are considered the main indicators of the quality of abrasive garnet sands, based on the obtained results, an analysis was made of the correlation of abrasive and cutting ability values with other measured properties. It is shown that, taking into account the presence of impurities, the average hardness of all three sand samples coincides within the error and is (17.2 ± 3.5) GPa, the elastic modulus was (274 ± 43) GPa. The roughness value for all three samples coincided within the error. At the same time, the obtained values of the hardness of individual garnet particles are comparable with the results of studies of garnet particles from various deposits or produced by other companies. It is shown that the main parameters of the studied, which are in direct correlation with the abrasive and cutting ability, are the strength and modulus of elasticity, as well as the percentage of garnet particles in the sand mixture. The content of impurity particles with lower hardness in the investigated sands nonlinearly underestimates the strength, abrasive and cutting abilities.

Key words: garnet, abrasive sand, hardness, abrasive ability, cutting ability

ВВЕДЕНИЕ

Гранатовые пески находят широкое применение в различных отраслях в области очистки и обработки поверхностей материалов. Они используются для очистки поверхностей при помощи струйных агрегатов, для очистки жидкостей от механических примесей, гидроабразивной резки материалов, а также для шлифовки и полировки поверхностей [1-2].

Абразивный песок может состоять из частиц различных материалов, форм и иметь в составе примеси других минералов. Эти и другие обстоятельства, такие как параметры сопла и скорость подачи материала при гидроабразивной резке, сказываются на эффективности обработки и качестве поверхности, подвергнутой обработке [3-7].

Применение гранатового песка в абразивных пескоструйных агрегатах является более выгодным и эффективным по сравнению, например, с измельченным стеклом [8], поскольку при его использовании страдает производительность резки: расход абразивного материала больше, глубина и снятие объема материала меньше [9].

При фрезеровании механические свойства абразивных частиц напрямую влияют на качество обработки. Работы [10-11] демонстрируют, что скорость снятия материала и шероховатость получаемой поверхности увеличиваются при увеличении твердости частиц. Более твердые абразивные частицы обеспечивают высокую режущую способность [12]. Соотношение между твердостью обрабатываемой поверхности и абразивных частиц является более значимым фактором, чем форма частиц. Однако к большей шероховатости может

привести использование частиц разных фракций в составе абразивного песка [13].

Наиболее значимыми в глобальном экономическом смысле на сегодняшний день являются месторождения граната, находящиеся в Австралии и Индии. Однако в Российской Федерации в настоящее время разрабатывается несколько месторождений с целью вывода на рынок отечественных марок данной продукции [14]. Механические свойства гранатовых песков и гранатовых концентратов повсеместно исследуются с целью выявления наиболее эффективного и экономически выгодного с точки зрения импортозамещения сырья для абразивной обработки. Исследования [15-16] показали, что гранатовый абразивный песок может быть использован повторно при гидроабразивной резке благодаря образованию частиц, имеющих приемлемую форму при формировании струи. Типичные значения твердости гранатовых частиц – 20-24 ГПа [17].

Поскольку для задач пескоструйной обработки и гидроабразивной резки материалов наиболее критичными показателями качества являются значения абразивной и режущей способностей песка, то поиск корреляции этих феноменологических характеристик с базовыми физическими свойствами минералов, составляющих песок, а также с их процентным соотношением, является крайне актуальной задачей. Настоящая работа направлена на выявление влияния механических свойств и химического состава гранатовых песков на их показатели качества и эффективность использования.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектами исследований работы являются три образца, представленные на рис. 1: гранатовый песок и два гранатовых концентрата.

Гранатовый песок из Австралии, производимый компанией GMA Garnet PTY Ltd., фракции 80 mesh. Согласно ТУ 3988-002-76245879-2011 данная фракция соответствует зернам размером 150-300 мкм. Содержание граната составляет 97-98%. Допускается содержание ильменита – 1-2%; циркона – < 0,2%; кварца и свободных силикатов – < 0,5%.

Две пробы гранатовых концентратов из России (1 и 2), производимых организацией ИМ-ГРЭ, из которых отситована фракция 80 mesh (0,178 мм) – 120 mesh (0,125 мм). Минеральный состав концентрата 1: гранат – 95,88-97,38%; ильменит – 0,65-1,1%; амфиболы, пироксены – 0,85-1,0%; кварц (ожелезненный) – 0,65-1,13%. Минеральный состав концентрата 2: гранат – 78,6-80,0%; ильменит – 1,3-1,5%; амфиболы, пироксены – 7,67-15,87%.

Для исследования таких свойств как твердость, модуль упругости и шероховатость потребовалась следующая пробоподготовка. Небольшое количество каждого из перечисленных песков засыпалось фенольным порошком для горячей запрессовки. Полученные шайбы с частицами гранатового песка были отполированы для того, чтобы сделать срез зерен доступным для измерений (рис. 2).

Далее приняты обозначения исследуемых песков: 0 – образец гранатового песка из Австралии, 1 – гранатовый концентрат с содержанием граната 95,88-97,38%, 2 – гранатовый концентрат с содержанием граната 78,6-80,0%.

Измерение твердости и модуля упругости проводилось методом инструментального индентирования, при котором регистрируется зависимость нагрузки от глубины внедрения индентора. Испытания проводились на нанотвердомере “Наноскан-4D” (ТИСНУМ, Россия) [18] в соответствии с ГОСТ Р 8.748-2011 [19]. Используемый индентор – алмазная трехгранная пирамида типа Берковича. Максимальная нагрузка – 100 мН. Время нагружения и разгружения – 10 с, время выдержки – 2 с. На каждом из образцов проведено измерение 50-60 частиц серией по 10 уколов на каждой частице.



Рис. 1. Внешний вид образцов
Fig. 1. Appearance of samples



Рис. 2. Вид образца после шлифовки и полировки
Fig. 2. View of the sample after grinding and polishing

Исследование морфологии и шероховатости поверхности проводилось при помощи оптического конфокального 3D-профилометра S Neox (Sensofar, Испания) в соответствии с ГОСТ 2789-73 [20]. Были получены трехмерные изображения поверхности и измерен параметр шероховатости Ra (среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля).

Статическая прочность измерялась на приборе ДДА-33 (Friability Tester). Частицы гранатового песка подвергались разрушению, при этом регистрировалось резкое изменение прикладываемой силы, которое может быть вызвано как разрушением образца, так и образованием трещин. Полное разрушение образца может не быть достигнуто.

Абразивная и режущая способности измерялись на установке УАС-2М конструкции ИСМ (ГОСТ 9206-80) в соответствии с ГОСТ 28924-91 [21]. Метод заключается в истирании диска водной суспензией исследуемого материала. Испытания на абразивную способность проводились в течение 3 мин, до полного износа шлифпорошка. Скорость вращения планшайбы составляла 100 об/мин, масса груза – 2 кг, масса навески гранатового порошка – 0,15 г. Испытания на режущую способность проводились в течение 1 мин. Скорость вращения подвижного элемента испытательной конструкции 100 об/мин, масса груза 2,5 кг, масса навески гранатового порошка составляла 1 г.

Насыпная плотность измеряется в соответствии с ГОСТ 28924-91 п.3 путем свободного насыпания шлифматериала через соответствующую воронку в мерный цилиндр определенного объема.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Большинство исследуемых зерен после полировки имеют шероховатость 20 нм, но также присутствуют частицы с шероховатостью около 60 нм. Более шероховатые частицы имеют на поверхности видимые трещины и неровности, связанные, по-видимому, с тем, что частицы абразивного песка имеют пористую структуру или сильную неоднородность.

Значения средней арифметической шероховатости, усредненные по 9 частицам каждого из видов песков, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения шероховатости Ra
Table 1. Ra roughness values

Образец	Шероховатость, нм
0	21 ± 13
1	21 ± 11
2	24 ± 16

Согласно ГОСТ Р 8.748-2011 глубина индентирования должна быть не менее чем в 20 раз больше значения параметра Ra, что для исследованных образцов соответствует нормальной нагрузке на индентор порядка 150-200 мН. Однако при таких нагрузках на исследуемых частицах наблюдается образование трещин, что категорически недопустимо при измерении твердости, поскольку в этом случае твердость имеет завышенные значения вследствие того, что часть работы по внедрению индентирующего наконечника в материал расходуется на образование и рост трещин, а не на пластическую деформацию материала. Исходя из перечисленных факторов, максимальная сила нагружения была выбрана 100 мН.

Значения твердости и модуля упругости исследованных образцов представлены в табл. 2.

Разброс измеренных значений обусловлен наличием зерен различных минералов, имеющих более низкую твердость, чем гранат. Также присутствуют зерна с включениями, имеющими как визуальные отличия, так и отличия в механических свойствах (рис. 3). Разброс на отдельных однородных частицах составляет не более 3%.

Детальный анализ всего объема проведенных исследований позволяет выделить группы зерен в составе образцов по диапазонам значений твердости.

В группе 1 значения твердости лежат в диапазоне 18-20 ГПа, что соответствует табличному значению твердости граната. В эту группу попадает наибольшее количество зерен, на которых были проведены испытания – процентные соотношения таких зерен для каждого из образцов: образец 0 – 78,4%; образец 1 – 87,3%; образец 2 – 68,9%.

Таблица 2

Твердость и модуль упругости образцов
Table 2. Hardness and modulus of elasticity of samples

Образец	Глубина индентирования, нм	Твердость, ГПа	Модуль упругости, ГПа
0	610 ± 80	17,2 ± 3,5	274 ± 43
1	610 ± 140	17,9 ± 3,2	268 ± 51
2	610 ± 80	17,2 ± 3,3	263 ± 56

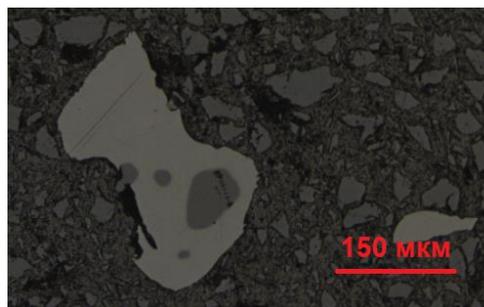


Рис. 3. Вид зерна, имеющего включения
Fig. 3. Appearance of grain with inclusions

В группе 2 значения твердости зерен ниже и имеют большой разброс значений, от 2 до 13 ГПа. По оптическим изображениям поверхностей образцов также видно, что на образце 0 испытаниям инструментальным индентированием было подвергнуто большее количество негранатовых частиц, что отразилось на среднем значении твердости песка. Это обстоятельство также объясняет несоответствие процентного содержания гранатовых зерен заявленным производителем цифрам (согласно химическому составу порошков).

В табл. 3 приведены значения статической прочности – усредненные значения максимальной нагрузки, приложенной к частицам порошка, которая приводила к их разрушению. Сильный разброс результатов данных измерений связан как с неоднородностью зерен по составу, так и с большим разбросом по форме и размеру.

Данные об абразивной, режущей способностях, результаты измерений насыпной плотности также представлены в табл. 3.

Таблица 3

Механические свойства образцов
Table 3. Mechanical properties of samples

Образец	Прочность, Н	Абразивная способность, г	Режущая способность, г/мин	Насыпная плотность, г/см ³
0	5,6 ± 4,1	0,367 ± 0,001	0,098 ± 0,004	2,30 ± 0,04
1	5,1 ± 3,4	0,308 ± 0,005	0,081 ± 0,002	2,34 ± 0,01
2	5,1 ± 3,7	0,297 ± 0,010	0,079 ± 0,003	2,22 ± 0,01

ВЫВОДЫ

Полученные в данной работе результаты показывают, что все три образца характеризуются примерно одинаковой (в пределах погрешности) величиной шероховатости и усредненной твердости. При этом показано, что схожие средние значения твердости связаны с большим разбросом дан-

ных, обусловленным наличием примесных частиц с существенно отличающимися механическими свойствами.

Прямая корреляция значений абразивной и режущей способности наблюдается с значениями модуля упругости и величиной прочности. При этом модуль упругости влияет в гораздо меньшей степени.

Наибольшей прочностью, абразивной и режущей способностями обладают частицы образца гранатового песка, производимого Австралийской компанией GMA Garnet PTY Ltd. Несмотря на существенные различия содержания граната в концентратах 1 и 2, они демонстрируют схожие физико-механические свойства во всех видах проведенных исследований.

Значения твердости большей части зерен составляют 18-20 ГПа, такие зерна соответствуют механическим свойствам граната. Принимая во внимание паспортное процентное содержание граната в исследуемых образцах, можно заключить, что чем выше содержание более твердых частиц, тем выше прочность, абразивная и режущая способности песка. Однако, данная зависимость носит существенно нелинейный характер. Кроме того, показатели формы частиц песка также могут оказывать влияние на эти показатели качества, что требует отдельного систематического изучения, в том числе с привлечением методов гидродинамического моделирования поведения таких частиц в потоке воздуха или жидкости.

Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФГБНУ ТИСНУМ «Исследования наноструктурных, углеродных и сверхтвердых материалов».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The study was carried out using the equipment of the Center for Collective Use of the Federal State Budgetary Scientific Institution TISNUM “Research of nanostructured, carbon and superhard materials”.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Folkes J. Waterjet.** An innovative tool for manufacturing. *J. Mater. Process. Technol.* 2009. V. 209. N 20. P. 6181–6189. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.05.025.
2. **Liu X., Liang Z., Wen G., Yuan X.** Waterjet machining and research developments: a review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. V. 102. N 5-8. P. 1257-1335. DOI: 10.1007/s00170-018-3094-3.

REFERENCES

1. **Folkes J. Waterjet.** An innovative tool for manufacturing. *J. Mater. Process. Technol.* 2009. V. 209. N 20. P. 6181–6189. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.05.025.
2. **Liu X., Liang Z., Wen G., Yuan X.** Waterjet machining and research developments: a review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. V. 102. N 5-8. P. 1257-1335. DOI: 10.1007/s00170-018-3094-3.

3. **Mu M., Feng L., Zhang Q., Zang W., Wang H.** Study on abrasive particle impact modeling and cutting mechanism. *Energy Sci. Eng.* 2022. V. 10. N 1. P. 96-119. DOI: 10.1002/ese3.1012.
4. **Abdullah R., Mahrous A., Barakat A.** Surface quality of marble machined by abrasive water jet. *Cogent Eng.* 2016. V. 3. N 3. DOI: 10.1080/23311916.2016.1178626.
5. **Natarajan Y., Murugesan P.K., Mohan M., Liyakath Ali Khan S.A.** Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review. *J. Manuf. Process.* 2020. V. 49. P. 271-322. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.030.
6. **Llanto J.M., Tolouei-Rad M., Vafadar A., Aamir M.** Recent progress trend on abrasive waterjet cutting of metallic materials: A review. *Appl. Sci. (Switz.).* 2021. V. 11. N 8. P. 3344. DOI: 10.3390/app11083344.
7. **Subramani K., Vasudevan A., Karthik K., Kolappan S.** Insights of abrasive water jet polishing process characteristics and its advancements. *Mater. Today: Proc.* 2022. V. 52. P. 1113-1120. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.005.
8. **Perec A.** Experimental research into alternative abrasive material for the abrasive water-jet cutting of titanium. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018. V. 91. N 1. DOI: 10.1007/s00170-018-1957-2.
9. **Yu Y., Sun T., Yuan Y., Gao H., Wang X.** Experimental investigation into the effect of abrasive process parameters on the cutting performance for abrasive waterjet technology: a case study. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020. V. 107. N 5-6. P. 2757-2765. DOI: 10.1007/s00170-020-05183-3.
10. **Fowler G., Pashby I.R., Shipway P.H.** The effect of particle hardness and shape when abrasive water jet milling titanium alloy Ti₆Al₄V. *Wear.* 2009. V. 266. N 7-8. P. 613-620. DOI: 10.1016/j.wear.2008.06.013.
11. **Anu Kuttan A., Rajesh R., Dev Anand M.** Abrasive water jet machining techniques and parameters: a state of the art, open issue challenges and research directions. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2021. V. 43. N 220. DOI: 10.1007/s40430-021-02898-6.
12. **Khan A.A., Haque M.M.** Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of glass. *J. Mater. Process. Technol.* 2007. V. 191. N 1-3. P. 404-407. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.071.
13. **Babu M.K., Chetty O.V.** A study on the use of single mesh size abrasives in abrasive waterjet machining. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2006. V. 29. N 5. P. 532-540. DOI: 10.1007/s00170-005-2536-x.
14. **Левченко Е.Н., Соленикова Е.О.** Морфоструктурные особенности гранатов прибрежно-морских россыпей, определяющие технологию их переработки. *Руды и металлы.* 2022. № 1. С. 114–130. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10023.
15. **Perec A.** Research into the disintegration of abrasive materials in the abrasive water jet machining process. *Materials.* 2021. V. 14. N 14. P. 3940. DOI: 10.3390/ma14143940.
16. **Schramm A., Morczinek F., Götze U., Putz M.** Technical-economic evaluation of abrasive recycling in the suspension fine jet process chain. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020. V. 106. P. 981–992. DOI: 10.1007/s00170-019-04651-9.
3. **Mu M., Feng L., Zhang Q., Zang W., Wang H.** Study on abrasive particle impact modeling and cutting mechanism. *Energy Sci. Eng.* 2022. V. 10. N 1. P. 96-119. DOI: 10.1002/ese3.1012.
4. **Abdullah R., Mahrous A., Barakat A.** Surface quality of marble machined by abrasive water jet. *Cogent Eng.* 2016. V. 3. N 3. DOI: 10.1080/23311916.2016.1178626.
5. **Natarajan Y., Murugesan P.K., Mohan M., Liyakath Ali Khan S.A.** Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review. *J. Manuf. Process.* 2020. V. 49. P. 271-322. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.030.
6. **Llanto J.M., Tolouei-Rad M., Vafadar A., Aamir M.** Recent progress trend on abrasive waterjet cutting of metallic materials: A review. *Appl. Sci. (Switz.).* 2021. V. 11. N 8. P. 3344. DOI: 10.3390/app11083344.
7. **Subramani K., Vasudevan A., Karthik K., Kolappan S.** Insights of abrasive water jet polishing process characteristics and its advancements. *Mater. Today: Proc.* 2022. V. 52. P. 1113-1120. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.005.
8. **Perec A.** Experimental research into alternative abrasive material for the abrasive water-jet cutting of titanium. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018. V. 91. N 1. DOI: 10.1007/s00170-018-1957-2.
9. **Yu Y., Sun T., Yuan Y., Gao H., Wang X.** Experimental investigation into the effect of abrasive process parameters on the cutting performance for abrasive waterjet technology: a case study. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020. V. 107. N 5-6. P. 2757-2765. DOI: 10.1007/s00170-020-05183-3.
10. **Fowler G., Pashby I.R., Shipway P.H.** The effect of particle hardness and shape when abrasive water jet milling titanium alloy Ti₆Al₄V. *Wear.* 2009. V. 266. N 7-8. P. 613-620. DOI: 10.1016/j.wear.2008.06.013.
11. **Anu Kuttan A., Rajesh R., Dev Anand M.** Abrasive water jet machining techniques and parameters: a state of the art, open issue challenges and research directions. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2021. V. 43. N 220. DOI: 10.1007/s40430-021-02898-6.
12. **Khan A.A., Haque M.M.** Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of glass. *J. Mater. Process. Technol.* 2007. V. 191. N 1-3. P. 404-407. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.071.
13. **Babu M.K., Chetty O.V.** A study on the use of single mesh size abrasives in abrasive waterjet machining. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2006. V. 29. N 5. P. 532-540. DOI: 10.1007/s00170-005-2536-x.
14. **Levchenko E.N., Solenikova E.O.** Morphostructural features of garnets of coastal-marine placers, determining the technology of their processing. *Ores and metals.* 2022. N. 1. P. 114–130. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10023.
15. **Perec A.** Research into the disintegration of abrasive materials in the abrasive water jet machining process. *Materials.* 2021. V. 14. N 14. P. 3940. DOI: 10.3390/ma14143940.
16. **Schramm A., Morczinek F., Götze U., Putz M.** Technical-economic evaluation of abrasive recycling in the suspension fine jet process chain. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020. V. 106. P. 981–992. DOI: 10.1007/s00170-019-04651-9.

17. **Hvizdos P., Zelenak M., Hloch S.** Hardness and elasticity of abrasive particles measured by instrumented indentation. *MM Sci. J.* 2016. V. 1. P. 869-871. DOI: 10.17973/MMSJ.2016_03_201601.
18. **Гладких Е.В., Кравчук К.С., Усеинов А.С., Никитин А.А., Рогожкин С.В.** Сравнение эффектов упрочнения сталей Eurofer97 и ODS Eurofer, возникающих под действием ионного облучения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 57-62. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.2y.
19. ГОСТ Р 8.748–2011 (ИСО 14577–1:2002). Государственная система обеспечения единства измерений. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Ч. 1. Метод испытаний. М.: Стандартиформ. 2013. 28 с.
20. ГОСТ 2789-73. Межгосударственный стандарт. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М.: Стандартиформ. 2018. 7 с.
21. ГОСТ 28924-91. Межгосударственный стандарт. Материалы шлифовальные. Методы определения физических и физико-механических свойств. М.: ИПК Издательство стандартов. 2004. 14 с.
17. **Hvizdos P., Zelenak M., Hloch S.** Hardness and elasticity of abrasive particles measured by instrumented indentation. *MM Sci. J.* 2016. V. 1. P. 869-871. DOI: 10.17973/MMSJ.2016_03_201601.
18. **Gladkikh E.V., Kravchuk K.S., Useinov A.S., Nikitin A.A., Rogozhkin S.V.** Comparison of Hardening Effects of Eurofer97 and Ods Eurofer Steels Under Ion Irradiation. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 12. P. 57-62 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.2y.
19. GOST R 8.748–2011 (ISO 14577–1:2002). State system for ensuring the uniformity of measurements. Metals and alloys. Measurement of hardness and other characteristics of materials during instrumental indentation. Pt. 1. Test method. M.: Standartinform. 2013. 28 p. (in Russian).
20. GOST 2789-73. Interstate standard. Surface roughness. Parameters and characteristics. M.: Standartinform. 2018. 7 p. (in Russian).
21. GOST 28924-91. Interstate standard. Grinding materials. Methods for determining physical and physico-mechanical properties. M.: IPK Standards Publishing House. 2004. 14 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 30.06.2022

Принята к опубликованию 06.09.2022

Received 30.06.2022

Accepted 06.09.2022