

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕЦИКЛИНГА ОТРАБОТАННОГО ГРАНАТОВОГО ПЕСКА ПОСЛЕ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ

Ю. М. Федорчук, В. В. Матвиенко

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет», г. Томск, Россия*

Рецензент д-р техн. наук, профессор А. И. Сечин

Ключевые слова: абразив; гидроабразивная резка; гранатовый песок; промышленные отходы; ресурсосберегающие технологии; утилизация отходов.

Аннотация: Дана оценка образованию отходов гидроабразивной резки гранатовым песком в г. Томске. По результатам проведенных лабораторных исследований сделан вывод о рентабельности переработки пульпы и возврате в цикл крупнодисперсных частиц абразива. Показана разработанная лабораторная установка, в ходе эксплуатации которой выявлены основные недостатки и разработана полупромышленная установка. Регенерированный абразив на полупромышленной установке представлен преимущественно крупнодисперсной фракцией (частиц с диаметром более 75 мкм > 90 %), что положительно влияет на качество реза при гидрорезке.

Введение

Гидроабразивная резка представляет собой способ получения заданных размеров изделий благодаря использованию направленного потока жидкоабразивной смеси. Гидроабразивный станок с числовым программным управлением (ЧПУ), высокой скоростью и точностью разрезает материал, при этом процесс резки почти не зависит от типа материала. Благодаря высокой эффективности, простоте в эксплуатации и высокой производительности, гидрорезка стала основным способом обработки материалов и широко используется в машиностроительной, аэрокосмической, автомобильной, судостроительной и других отраслях промышленности.

Федорчук Юрий Митрофанович – доктор технических наук, профессор, академик Российской академии естественных наук, отделение общетехнических дисциплин школы базовой инженерной подготовки; Матвиенко Владимир Владиславович – ассистент отделения общетехнических дисциплин школы базовой инженерной подготовки, e-mail: vvm32@tpu.ru, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Россия.

Для повышения эффективности процесса резки в высокоскоростную струю (300...900 м/с) потока воды под давлением 200...600 МПа вводится поток абразивных частиц [1]. В качестве абразива используются частицы природного (кремень, естественный корунд, природные алмазы, гранат) и синтетического (электрокорундовые абразивные материалы, монокорунд, карбид бора, синтетические алмазы и т.д.) происхождения. Преимущественно используется гранатовый песок, по минеральному составу состоящий из альмандина $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$. Гранатовый песок причиняет меньший износ соплу по сравнению с электрокорундом и карбидом кремния, при этом имеет приемлемую твердость для резания большинства материалов [2]. Альмандин – железисто-алюминиевый гранат вишнево-красного цвета с высокой твердостью – 7–8 по шкале Мооса, плотностью – 4,1...4,3 г/см³.

В общей структуре затрат на гидрорезку около 50 % составляют затраты на гранатовый песок, который импортируется в Россию из-за рубежа: Индии, Австралии, Китая. По мнению специалистов, достоинство водоабразивной резки заключается в раскрое толстых деталей и полуфабрикатов с толщиной более 70 мм. При увеличении толщины обрабатываемой детали, соответственно, увеличивается расход абразива. В 2013 г. в России использование гранатового песка в водоабразивной резке находилось на уровне 25 000 т в год [3]. В городе Томске ежегодно в водоабразивной резке используется 55...80 т гранатового песка, за 2016 – 2019 гг. потрачено 285,5 т абразива (табл. 1), который после использования был вывезен на полигоны.

Гранатовый песок в процессе резки подвергается разрушению в результате соударений с разрезаемым материалом и самим собой. Используемый в процессе абразив в основном взаимодействует с обрабатываемой деталью в контактных зонах 1 и 2, максимально при этом измельчаясь, а в области 3 он почти не взаимодействует с заготовкой (рис. 1). Таким образом, только 30 – 50 % абразива действительно используется (за один цикл). Толщина и материал обрабатываемой заготовки влияют на количество разрушаемого в процессе резки абразива [4].

Таблица 1

Использование гранатового песка в гидроабразивной резке на предприятиях Томской области, т

Предприятие	2016	2017	2018	2019	Предпринимаемые действия с отходами
АО «Томзэл»	60	60,5	55	30	Вывоз пульпы на полигон
Фирма «Гидрорез»	–		10		Засыпка ям и траншей на территории предприятия
Корпус №16 ФГАОУ ВО «НИ ТПУ»	15				В зимнее время – использование в качестве противогололедного материала; летнее – засыпка ям и траншей
Итого	75	75,5	80	55	–

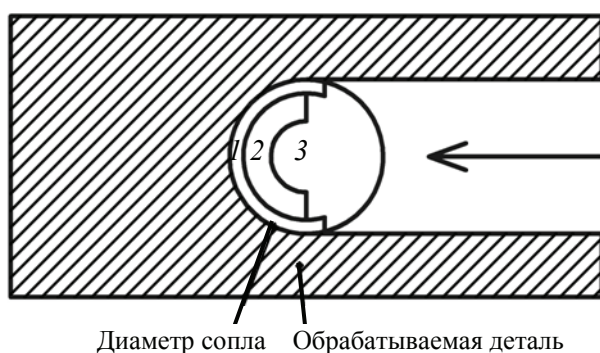


Рис. 1. Разрушение абразива в гидроабразивной струе [4]

Частицы разрезаемого материала смешиваются с частично дезинтегрированным гранатовым песком и образуют пульпу, которая в настоящее время сбрасывается в окружающую среду. Отработанный гранатовый песок, полученный в результате гидроабразивной резки в промышленности, вывозится на депонирование в отвалы, а в редких случаях используется как песок для строительных нужд и в дорожном строительстве [5, 6]. Использование некондиционного абразива, с размером частиц менее 40 мкм, а также мелкодисперсных частиц разрезаемых материалов в строительных изделиях позволяет решить задачи по охране окружающей среды (исключается непосредственный контакт отходов с окружающей средой), освобождать или не задействовать новые ценные земельные ресурсы под полигоны для хранения отходов [7].

Ознакомление с отечественной и иностранной литературой по использованию отходов не дает достаточной информации по рециркуляции отходов гидроабразивной резки в России и странах СНГ, что возможно связано с отсутствием интереса к отходам, образующимся в небольших количествах. За рубежом, а именно в Чехии, Малайзии и США, проводят исследования по регенерации песка, но они больше теоретического, чем практического характера, так как современные устройства и системы для регенерации гранатового песка не способны дифференцировать абразивные частицы гранатового песка от частиц разрезаемых материалов аналогичного размера [8 – 10]. Посторонние материалы создают нежелательные проблемы в процессе гидроабразивной резки, находясь в регенерированном абразиве, – ускоряют износ сопла станка резки, уменьшают скорость резки, забивают канал подачи абразива. Следовательно, существует необходимость в создании установки регенерации абразива, для эффективного удаления инородных материалов.

Цели исследования – оценка возможности восстановления отходов гранатового песка после гидрорезки и разработка полупромышленной установки по регенерации отработанного гранатового песка.

Методы исследования

В ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» поступило около двух тонн отработанного гранатового песка, который был использован в гидрорезке различных материа-

лов (сталь, пластик, стекло, дерево, нержавейка и т.д.) фирмой ООО «Гидрорез» (г. Томск). Для отбора проб весь объем песка был тщательно усреднен путем перелопачивания массы в целях нивелирования флуктуаций химического и гранулометрического состава.

Исследование гранулометрического состава нового (от поставщика), отработанного и регенерированного гранатового песка проводилось согласно ГОСТ 27562–87 методом ситового анализа – автоматически ситовым вибрационным анализатором АСВ-200, а также вручную с промывкой водой. Использовали сита с размерами ячеек: 100, 75, 44 мкм. Определение насыпной плотности и влажности проводилось согласно ГОСТ 8735–88.

Исследование морфологии частиц гранатового песка проводилось с использованием электронного микроскопа JEOL JCM 6000.

Результаты и их обсуждение

Основными критериями, влияющими на возможность возврата абразива в цикл гидрорезки, являются морфология частиц и гранулометрический состав. Известно, что минимальный диаметр частиц абразива, пригодный для гидрорезки – более 40 мкм [11]. По результатам гранулометрического анализа видно, что 62 масс.% частиц находятся в классе +75 мкм, что подтверждает возможность возврата отработанного абразива после регенерации в цикл резки:

Класс, мкм	+100	–100 + 75	–75 + 44	–44
Массовое содержание, %	50,4	11,9	14,5	23,2

Частицы отработанного абразива преимущественно остроугольные и много осколков, своей формой отличных от изометрической, которая присуща новому абразиву от поставщика, количественно преобладают частицы диаметром менее 70 мкм (рис. 2).

Остроугольная форма частичек максимально эффективна при гидрорезке [11]. В ходе исследований определена насыпная плотность отработанного гранатового песка – $1,813 \text{ кг/м}^3$, истинная плотность – $4,1 \text{ кг/м}^3$. Влажность отработанного абразива – 11 масс.%.

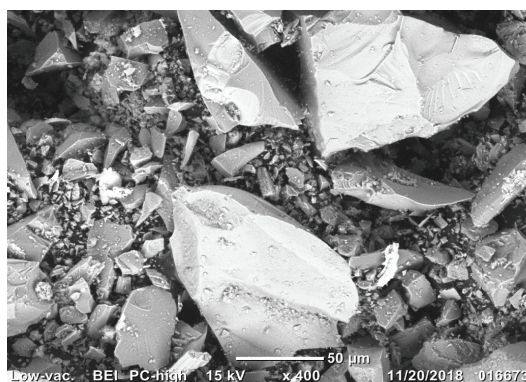


Рис. 2. Микрофотография частиц отработанного гранатового песка

Разработанная лабораторная установка регенерации отходов гидроабразивной резки гранатовым песком, представленная на рис. 3, защищена патентом РФ на изобретение [12].

Регенерация абразива на установке заключается в следующем: пульпу закачивают пульпонасосом 1 в накопительный бункер 2, оборудованный перемешивающим устройством 3. Одновременно с подачей пульпы, в накопительный бункер подают воду из бака 4. При вращении лопастей перемешивающего устройства твердая фракция переходит во взвешенное состояние, и образующаяся пульпа сливается через дозатор на концентрирующий стол 5, который приводится в движение инерционным приводом. При продольных колебаниях концентрирующего стола и равномерной подаче смывной воды вдоль длинной стороны деки стола обеспечивается разрыхление слоя частиц подаваемой смеси на поверхности концентрирующего стола и их транспортирование. В результате сноса верхнего слоя частиц потоком жидкости поперек деки и транспортирования нижнего слоя (где концентрируются тяжелые частицы) вдоль деки происходит расслоение частиц различной плотности либо крупности, что позволяет разделить частицы различной крупности на различные массопотоки. Так как частицы разрезаемых материалов относятся к иловым с дисперсностью, не превышающей 15 мкм, то они уносятся массопотоком верхнего слоя, не смешиваясь с крупнодисперсными частицами гранатового песка (рис. 4). Веер частиц гранатового песка, образованный вдоль деки стола, позволяет выделить массопотоки мелкодисперсного и крупнодисперсного гранатового песка, в результате чего верхний слой частиц сносится потоком смывной воды в одном направлении, а транспортирование нижнего слоя (где концентрируются тяжелые частицы) – в другом (см. рис. 4).

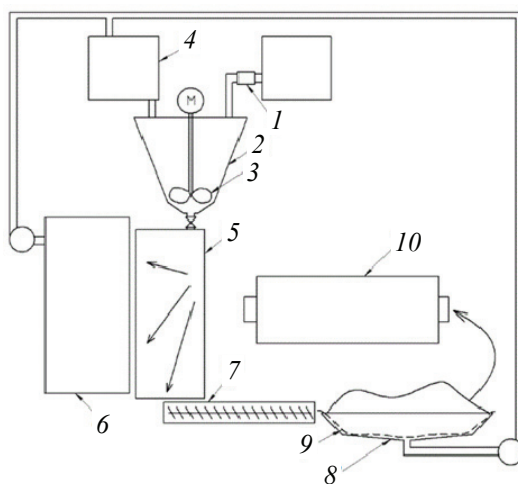


Рис. 3. Технологическая схема лабораторной установки регенерации:

1 – пульпонасос; 2 – накопительный бункер; 3 – перемешивающее устройство; 4 – бак для воды; 5 – концентрирующий стол; 6 – отстойник; 7 – шнек; 8 – фильтрационная емкость конической формы; 9 – сетка фильтрационной емкости; 10 – вращающаяся сушильная печь

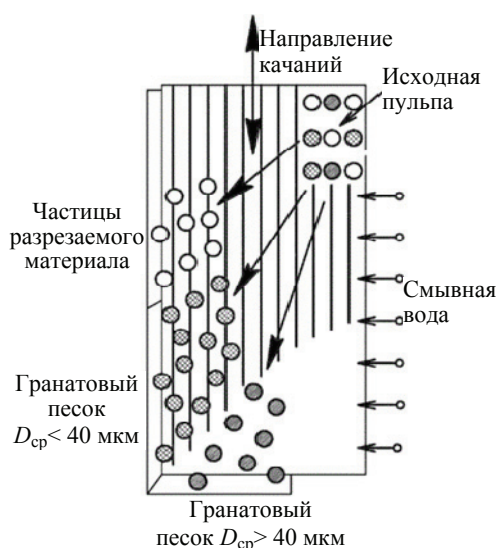


Рис. 4. Схема массопотоков по поверхности деки концентрационного стола (вид сверху)

ила воду из отстойника закачивают в бак 4, обеспечивая замкнутый водооборот. Воду из фильтрационной емкости также направляют в бак 4.

В ходе лабораторных испытаний выявлены следующие недостатки установки.

1. На гидроабразивных станках с самодельными приемными ваннами для хранения отходов абразивов отсутствует решетка, сепарирующая крупные обрезки обрабатываемых деталей от использованного абразива, поэтому в отходах гранатового песка периодически попадают крупные обрезки (металлические, керамические, пластмассовые, деревянные и т.д.) диаметром свыше 10 мм. Крупная фракция разрезаемых материалов забивает приемную воронку концентрационного стола, а также застревает на выходе из накопительного бункера, происходит заклинивание лопастей перемешивающего устройства в накопительном бункере, вследствие чего необходимо останавливать работу установки и вручную удалять крупную фракцию.

2. Значительное содержание мелкой фракции (около 30 % – частицы диаметром менее 70 мкм), при нестабильной работе установки, в частности концентрационного стола, приводит к проскоку мелкодисперсных частиц в целевую фракцию, что снижает КПД процесса последующей гидрорезки.

По результатам проведенных исследований разработана полупромышленная установка регенерации отходов гидроабразивной резки гранатовым песком, аппаратурная схема которой представлена на рис. 5.

Полупромышленная установка включает в себя место хранения отработанного влажного абразива 1, виброгрохот 2 с контейнером 3 для частиц с диаметром более 5 мм и контейнером 4 для частиц с диаметром менее 5 мм, подъемник 5 с емкостью 6 для отработанного влажного абразива, бункер 7 со шнековым питателем 8. Выгрузочное окно шнекового питателя 8 расположено над зоной подачи исходного питания спирального

Частицы разрезаемого материала и гранатовый песок со средней дисперсностью D_{cp} менее 40 мкм стекают по желобу в отстойник 6 на осветление осадка. Крупнодисперсный влажный абразив по шнеку 7 транспортируют в фильтрационную емкость конической формы 8, оборудованную сливом для воды и фильтрующей сеткой 9 с диаметром ячейки 40 мкм. Первичное обезвоживание массы в фильтрационной емкости проводят в течение суток при температуре свыше 5 °С в сухой среде, после чего массу отправляют на сушку в барабанную вращающуюся печь 10. После осаждения

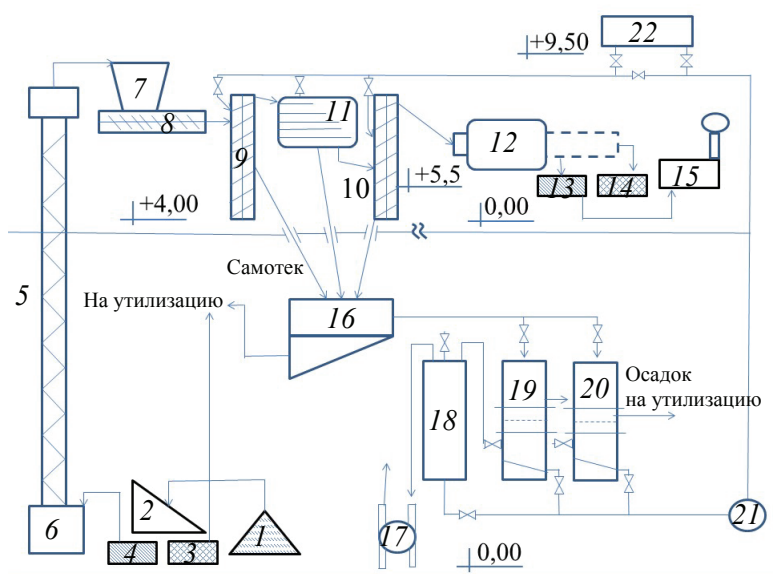


Рис. 5. Аппаратурная схема полупромышленной установки регенерации отходов гранатового песка

классификатора 9, люк выгрузки которого расположен над приемной воронкой концентрационного стола 11. Спиральный классификатор 10 установлен таким образом, чтобы поток регенерированного абразива с концентрационного стола 11 попадал в зону подачи исходного питания спирального классификатора 10, люк выгрузки которого сочленен с наклонным патрубком, направленным в загрузочный узел сушильной печи с буртарой 12. Сливы с концентрационного стола 11 и спиральных классификаторов 9 и 10 выполнены в виде дренажных труб, направленных в ловушку взвешенных частиц 16, сток которой направлен в нутч-фильтры 19 и 20, а вакуум-насос 17, соединен с нутч-фильтрами через каплеотбойник 18. Фильтрат из нутч-фильтров закачивается насосом 21 в бак оборотной воды 22.

Выход регенерированного абразива зависит от производительности используемого концентрационного стола СКО-0,5, равной 50 кг/час (рис. 6).

Аппаратурная схема (см. рис. 5) пригодна для переработки отработанного влажного гранатового песка с получением регенерированного для повторного его использования, когда отработанный гранатовый песок во влажном виде с примесью опилок обрабатываемых материалов из места хранения абразива 1 подается на виброгрохот 2, на котором сепарируются частицы с диаметром более 5 мм (обрезки разрезаемых деталей и полуфабрикатов). После сепарации все частицы с диаметром более 5 мм сыплются в контейнер 3, содержимое которого при заполнении вывозится на полигон. Отработанный влажный гранатовый песок, пройдя сепарацию на виброгрохоте 2, попадает в контейнер 4, а затем подается в емкость 6 подъемника 5 и попадает в бункер 7, откуда равномерно транспортируется шнековым питателем 8 в зону подачи исходного питания спирального классификатора 9, в которую также поступает вода для распульцовывания массы отработанного гранатового песка, после чего мелкая фракция пульпы

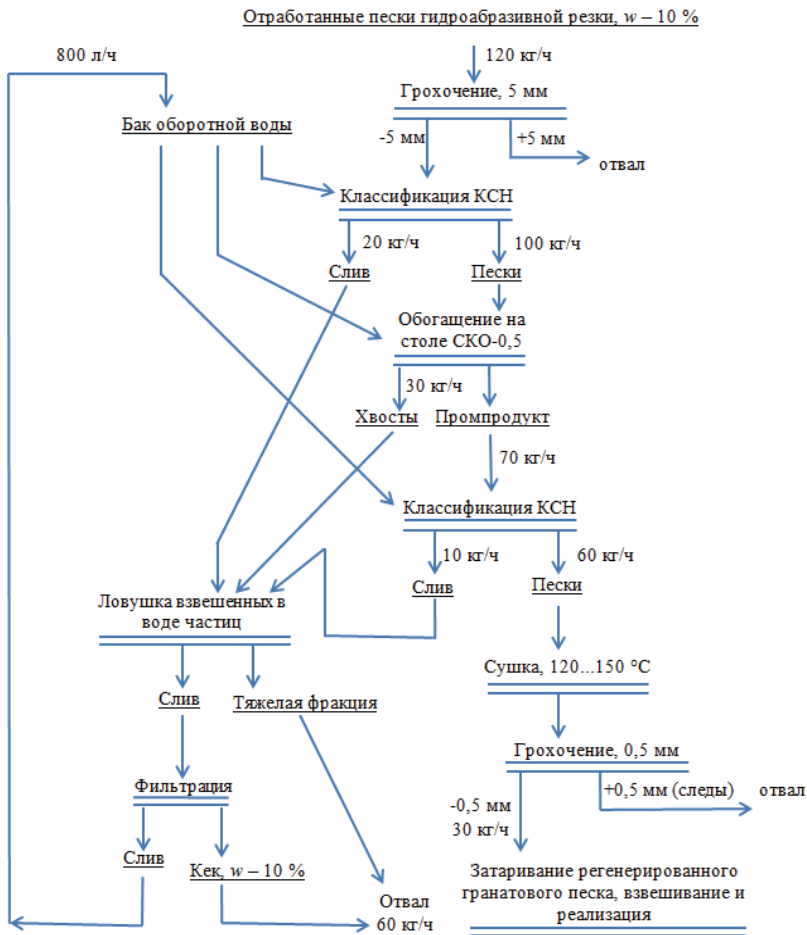


Рис. 6. Технологическая схема регенерации отходов отработанного гранатового песка

сливается через сливной порог в нижней части корыта спирального классификатора 9 и уходит в слив по дренажной трубе, попадая в ловушку взвешенных частиц 16. Осевшая на дно корыта спирального классификатора 9 крупная фракция пульпы направляется спиралью вверх по корыту, обезвоживается и разгружается через люк выгрузки классификатора в приемную воронку концентрационного стола 11, в которую также подается вода для распульповывания массы отработанного гранатового песка, после чего пульпа распределяется по поверхности деки концентрационного стола, осуществляющего возвратно-поступательные горизонтальные колебания. Разделяемые частицы в зависимости от их удельного веса и крупности расслаиваются и движутся по деке концентрационного стола с разными скоростями и направлением, образуя веер. Концентратная часть веера с частицами гранатового песка более 70 мкм направляется в желоб для сбора регенерированного гранатового песка, откуда затем поступает в зону подачи исходного питания спирального классификатора 10, в которую также подается вода для распульповывания массы регенерированного гранатового песка.

При условии нестабильности работы концентрационного стола, в регенерированном гранатовом песке могут присутствовать частицы менее 70 мкм, мелкая фракция пульпы сливается через сливной порог в нижней части корыта спирального классификатора 10 и уходит в слив по дренажной трубе, попадая в ловушку взвешенных частиц. Осевшая на дно корыта спирального классификатора 10 крупная фракция пульпы транспортируется спиралью вверх по корыту, обезвоживается и разгружается через люк выгрузки классификатора, перемещаясь по патрубку в загрузочный узел барабанной сушильной печи с бутарой 12, при вращении которой регенерированный гранатовый песок взаимодействует с теплоносителем, отдает влагу, после чего сепарируется в бутаре с размером ячеек 0,5 мм. Частицы с диаметром более и менее 0,5 мм направляются в емкости 14 и 13 соответственно, после чего содержимое емкости 13 направляется на фасовку по мешкам, на весах 15. Ловушка взвешенных частиц, представляет собой отстойник, в который направлены дренажные трубы классификаторов 9 и 10, а также концентрационного стола. Крупные частицы оседают на дне ловушки, а взвешенные в воде илистые частицы диаметром менее 15 мкм в переливающемся через край ловушки потоке воды попадают в нутч-фильтры открытого типа. Ил заливается в нутч-фильтры сверху, а с противоположной стороны дна под фильтрующим материалом вакуум-насосом 17 создается вакуум, под действием которого происходит разделение твердой и жидкой фаз ила. Вакуумный насос работает с фильтрами через каплеотбойник 18, который препятствует проскоку фильтрата в вакуум-насос.

Проведены испытания (рис. 7) регенерированного гранатового песка, полученного на полупромышленной установке; материал был регенерирован из отработанного гранатового песка 80 меш (Китай) и имел следующие характеристики:

- влажность песка – 0 %;
- форма гранул – остроугольная;
- истинная плотность материала – $4,1 \text{ г/см}^3$;
- фракционный состав песка – классы: $-0,3 + 0,1 \text{ мм} = 78,5 \%$;
 $-0,1 + 0,075 \text{ мм} = 11 \%$; $-0,075 + 0,044 \text{ мм} = 7,8 \%$; $-0,044 = 2,5 \%$;
- количество песка для проведения испытаний – 25 кг.



а)



б)

Рис. 7. Станок гидроабразивной резки Tesnocut Idroline 1740:

а – общий вид; б – вид сверху

В качестве материала сравнения в контрольном опыте применен свежий гранатовый песок 80 меш (Китай), отвечающий требованиям ТУ 3988-003-76245879-2017.

Оборудование, используемое в ходе испытаний, а также параметры резки:

- гидроабразивный станок Tecnocut Idroline 1740;
- обрабатываемые детали: дюралевый лист Д16Т толщиной 16 мм, лист стали Ст3 толщиной 14 мм;
- давление воды: 225 и 320 МПа;
- диаметры сапфировых фильер: 250 и 350 мкм.

Результаты испытаний резки деталей представлены в табл. 2. Расход при резке различных деталей регенерированным абразивом равен расходу нового абразива от поставщика – 400 г/мин. При резке стальных деталей регенерированным песком 140 меш с фильерой для воды (сапфировое сопло) диаметром 350 мкм, которая используется для нового песка от поставщика 80 меш, качество поверхности неудовлетворительное, наблюдается большая шероховатость поверхности реза (рис. 8, б). Для устранения данного недостатка необходимо произвести установку соответствующего комплекта технологической оснастки – фильеры для воды диаметром 250 мкм, в соответствии с имеющейся фракцией регенерированного песка 140 меш, что и было осуществлено (рис. 8, а). Это позволило добиться качества резки, сопоставимое с качеством исходного гранатового песка.

Таблица 2

Показатели гидроабразивной резки

Показатель	Гранатовый песок				
	от поставщика 80 меш		регенерированный 140 меш		
Скорость реза, мм/мин	100	80	100	70	70
Деталь	дюралевый лист	лист стали	дюралевый лист	лист стали	
Давление воды, МПа	225	320	225	225	320
Диаметр фильер, мкм	350	250	350	350	250
Качество поверхности реза	Удовлетворительно		Допустимо		Удовлетворительно

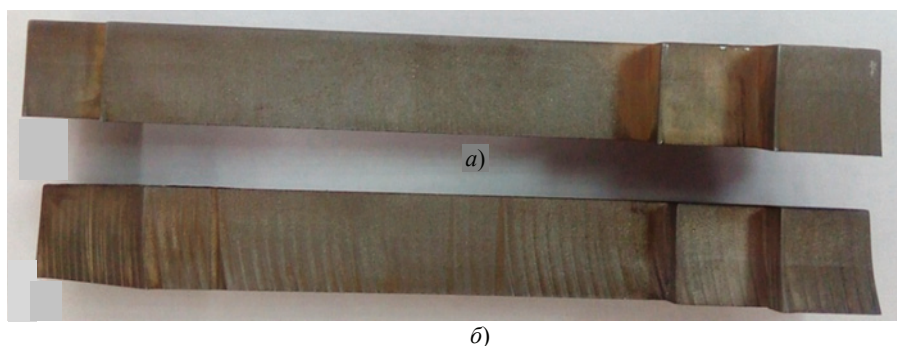


Рис. 8. Детали, полученные при использовании регенерированного гранатового песка

При резке наблюдаются небольшая ее неравномерность на разных участках детали и конгломерация песка при остановке его подачи при переходе на резку следующего элемента детали. Данные обстоятельства свидетельствуют о неравномерности подачи песка. Вероятно, это обусловлено наличием мелкой фракции песка. Для исключения неравномерности резки и конгломерации песка в подающем патрубке рекомендуется полностью исключить из состава фракции классы $-0,075 + 0,044$ мм = 7,8 % и $-0,044$ = 2,5 %. Скорость резки и расход абразива не изменились, соответственно резка регенерированным гранатовым песком не будет вызывать ускоренный износ смесительной трубки станка резки.

Заключение

Производительность лабораторной установки на основе концентрационного стола СКО-0,5 составила 0,85 т/сутки по регенерированному абразиву. Однако выявленные недостатки в ходе лабораторных испытаний, такие как проскок в целевую фракцию некондиционных частиц и нахождение в пульпе крупных обрезков разрезаемых деталей, снижают производительность установки.

Эмпирически определены оптимальные параметры регенерации на концентрационном столе СКО-0,5: углы стола относительно поперечной и продольной плоскостей составили соответственно 5° и 7° , длина хода деки – 16 мм, частота колебаний – 400 мин^{-1} . Разработанная полупромышленная установка позволяет провести комплексную переработку отработанного гранатового песка и вернуть в цикл гидроабразивной резки (после однократного использования) не менее 50 % абразива, при этом в регенерированном песке практически не содержится мелкодисперсных частиц с фракциями: $-0,075 + 0,044$ мм – 7,8 %; $-0,044$ – 2,5 %. Впервые разработаны ТУ 3988-001-55734858-2018 на регенерированный гранатовый абразив.

Скорость резки и качество реза поверхности регенерированным абразивом соответствуют новому абразиву. Таким образом, разработанный способ очистки отработанного гранатового песка попадает в разряд энерго- и ресурсосберегающих технологий благодаря повторному использованию данного малотоннажного отхода промышленности.

Список литературы

1. Perec, A. Disintegration and recycling possibility of selected abrasives for water jet cutting / A. Perec // DYNA. – 2017. – Vol. 84, No. 203. – P. 249 – 256. doi:10.15446/dyna.v84n203.62592
2. Барсуков, Г. В. Разработка технологии модификации вторичных техногенных абразивных материалов для гидроабразивного резания / Г. В. Барсуков, К. Ю. Фроленков, А. А. Александров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 3-2 (299). – С. 82 – 90.
3. Полянский, С. Н. Интенсификация использования технологической среды / С. Н. Полянский, С. В. Бутаков // Вестн. машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 59 – 61.
4. New Approach of Recycling of Abrasives for Water Jet Cutting / M. Duspara, T. Palatinuš, D. Marić [et al.] // Advances in Manufacturing Engineering and Materials :

Proceedings of the International Conference on Manufacturing Engineering and Materials (ICMEM 2018), 18 – 22 June, 2018, Nový Smokovec, Slovakia. – Springer Nature Switzerland, 2019. – P. 29 – 35.

5. Marshall Properties of Asphalt Mixture Containing Garnet Waste / S. R. Aletba, N. A. Hassan, E. Aminudin [et al.] // *Advanced Research in Materials Science*. – 2018. – Vol. 43, No. 1. – P. 22 – 27.

6. Characterization of Soil Mixed with Garnet Waste for Road Shoulder / W. N. H. M. Sani, A Mohamed, H. Md. Nor [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : The 12th International Civil Engineering Post Graduate Conference (SEPKA), The 3rd International Symposium on Expertise of Engineering Design (ISEED), 27–28 August 2018, Johor, Malaysia. – IOP Publishing Ltd, 2019. – Vol. 220. – P. 012052 (10 p.)*.

7. Кузнецова, Н. В. Исследование составов газобетонов с заполнителем из отходов литейного производства / Н. В. Кузнецова, И. И. Стерхов // *Вопросы соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. – 2014. – № 3 (53). – С. 24 – 30.

8. Recycling Capacity of Abrasives in Abrasive Water Jet Cutting / N. S. Guo, H. Louis, G. Meier, J. Ohlsen // *Jet Cutting Technology*. – 1992. – P. 503 – 523.

9. Babu, M. K. A Study on Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Machining / M. K. Babu, O. V. K. Chetty // *Wear*. – 2003. – Vol. 254, No. 7-8. – P. 763 – 773. doi: 10.1016/S0043-1648(03)00256-4

10. Wating Abrasive Recyclacion System after Hydroabrasive Erosion Process / J. Kmec, L. Bičejová, M. Gombár [et al.] // *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*. – 2012. – Vol. 10, No. 3. – P. 415 – 418.

11. Верченко, А. В. Повышение эффективности технологических процессов гидроабразивной резки деталей : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Верченко Алексей Викторович. – Ростов-на-Дону, 2017. – 169 с.

12. Пат. 2701017 Российская Федерация, МПК В03В 7/00, В03В 9/06. Способ рециклинга отходов гранатового песка от гидроабразивной резки / Ю. М. Федорчук, В. В. Матвиенко, А. С. Ивашутенко, Н. Н. Воронков, С. В. Рябцев, Д. В. Нарыжный; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2018147481 ; заявл. 29.12.2018 ; опубл. 24.09.2019, Бюл. № 27. – 12 с.

References

1. Pereg A. Disintegration and Recycling Possibility of Selected Abrasives for Water Jet Cutting, *DYNA*, 2017, vol. 84, no. 203, pp. 249-256, doi:10.15446/dyna.v84n203.62592

2. Barsukov G.V., Frolenkov K.Yu., Aleksandrov A.A. [Development of technology for the modification of secondary technogenic abrasive materials for waterjet cutting], *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and applied problems of engineering and technology], 2013, no. 3-2 (299), pp. 82-90. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Polyanskiy S.N., Butakov S.V. [Intensification of the use of the technological environment], *Vestnik mashinostroyeniya* [Bulletin of mechanical engineering], 2013, no. 4, pp. 59-61. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Duspara M., Palatinuš T., Marić D., Samardžić I., Ivandić Ž., Stoić A. Advances in Manufacturing Engineering and Materials, Proceedings of the International Conference on Manufacturing Engineering and Materials (ICMEM 2018), 18 - 22 June, 2018, Nový Smokovec, Slovakia, Springer Nature Switzerland, 2019, pp. 29-35.

5. Aletba S.R., Hassan N.A., Aminudin E., Jaya R.P., Hussein A.A. Marshall Properties of Asphalt Mixture Containing Garnet Waste, *Advanced Research in Materials Science*, 2018, vol. 43, no. 1, pp. 22-27.

6. Sani W.N.H.M., Mohamed A, Nor H.Md., Kamarudin N.A.S, Khalid N.H.A, Sam A.R.M., Rashid R.Ab. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: The 12th International Civil Engineering Post Graduate Conference (SEPKA), The 3rd International Symposium on Expertise of Engineering Design (ISEED), 27-28 August 2018, Johor, Malaysia, IOP Publishing Ltd, 2019, vol. 220, pp. 012052 (10 p.).

7. Kuznetsova N.V., Sterkhov I.I. [Research on the composition of aerated concrete with aggregate from foundry waste], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, no. 3 (53), pp. 24-30. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Guo N.S., Louis H., Meier G., Ohlsen J. Recycling Capacity of Abrasives in Abrasive Water Jet Cutting, *Jet Cutting Technology*, 1992, pp. 503-523.

9. Babu M.K., Chetty O.V.K. A Study on Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Machining, *Wear*, 2003, vol. 254, no. 7-8, pp. 763-773, doi: 10.1016/S0043-1648(03)00256-4

10. Kmec J., Bičejová E., Gombár M., Vagaská A., Sobotová L. Wating Abrasive Recyclacion System after Hydroabrasive Erosion Process, *Annals of Faculty Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering*, 2012, vol. 10, no. 3, pp. 415-418.

11. Verchenko A.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Rostov-on-Don, 2017, 169 p. (In Russ.)

12. Fedorchuk Yu.M., Matviyenko V.V., Ivashutenko A.S., Voronkov N.N., Ryabtsev S.V., Naryzhnyy D.V. *Sposob reitsiklinga otkhodov granatovogo peska ot gidroabrazivnoy rezki* [Method of recycling pomegranate sand waste from waterjet cutting], Russian Federation, 2019, Pat. 2701017. (In Russ.)

The Development of Technology for Recycling Spent Pomegranate Sand after Waterjet Cutting

Yu. M. Fedorchuk, V. V. Matvienko

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Keywords: abrasive; waterjet cutting; pomegranate sand; industrial waste; resource-saving technologies; recycling.

Abstract: An assessment of the formation of waste waterjet cutting with pomegranate sand in Tomsk is given. Based on the results of laboratory studies, it was concluded that the pulp processing is profitable and that coarse particles of abrasive are returned to the cycle. The developed laboratory installation is shown, during the operation of which the main disadvantages are identified and a semi-industrial installation is developed. The regenerated abrasive in a semi-industrial installation is predominantly represented by a coarse fraction (particles with a diameter of more than $75 \mu\text{m} > 90 \%$), which positively affects the quality of the cut during the hydraulic cutting.

© Ю. М. Федорчук, В. В. Матвиенко, 2020