ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-1):62-77
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.747.55; 621.924.9.023 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_62

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ОТ ПРОИЗВОДСТВА ЩЕБНЯ В КАЧЕСТВЕ АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ПЕСКОСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

И.А. Власов[1], С.А. Федоров[1,2], А.С. Петренко[3]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, e-mail: saf13d@mail.ru
[2] Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина УрО РАН, Екатеринбург, Россия
[3] ООО «Седельниковский щебеночный карьер», Екатеринбург, Россия

Аннотация: Проведен анализ возможности применения техногенных минеральных образований – отсевов дробления Седельниковского щебеночного карьера (Средний Урал) в качестве абразивного материала для пескоструйной обработки стали. Такой минеральный материал является потенциальным более дешевым и доступным сырьем для пескоструйной обработки металлических изделий в сравнении с применяемыми в производстве аналогами (купершлак, кварцевый песок, металлическая дробь и электрокорунд). Методы исследования включают оптическую микроскопию, сканирующую электронную микроскопию, рентгено-флюоресцентную спектроскопию. Очистка стальных пластин осуществлялась на пескоструйном аппарате. Для измерения шероховатости поверхности пластин применялся профилометр. Приведена вещественная характеристика исследуемых абразивных песков: отсевы дробления Седельниковского щебеночного карьера, купершлак, кварцевый песок, металлическая дробь и электрокорунд. Установлено, что характеристики применяемых в данной работе распространенных абразивных материалов и техногенных образований (отсевов дробления) по качеству полученной поверхности стальных пластин после пескоструйной обработки близки между собой. Сами отсевы дробления относятся к 4 классу опасности, имеют среднюю плотность (около 3,0 г/см^3), практически не содержат вредных примесей (в отличие от кварцевого песка и купершлака). Обрабатываемая поверхность после применения отсевов дробления имеет более гладкую поверхность с показателем шероховатости Ra = 7,6 (для фракции 0,1–0,5 мм) по сравнению с другими абразивными песками, по которым показатель шероховатости Ra доходит до 15.

Ключевые слова: отсевы дробления, купершлак, кварцевый песок, металлическая дробь, электрокорунд, стальные пластины, пескоструйная обработка, техногенные образования.

Благодарность: Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» № 075-03-2025-325 от 16.01.2025.

Для цитирования: *Власов И. А., Федоров С. А., Петренко А. С.* Возможность применения техногенных образований от производства щебня в качестве абразивного материала для пескоструйной обработки стали // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-1. – С. 62–77. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_62.

The possibility of using technogenic formations from the production of crushed stone as an abrasive material for sandblasting steel

I.A. Vlasov[1], S.A. Fedorov[1,2], A.S. Petrenko[3]

[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia
[2] Vatolin Institute of Metallurgy of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
[3] LLC «Sedel'nikovskij shhebenochnyj kar'er», Ekaterinburg, Russia

Abstract: The paper analyzes the possibility of using crushing screenings of the Sedelnikovsky crushed stone quarry (Middle Urals) as an abrasive material for sandblasting steel. Such a mineral material is a potential cheaper and more affordable raw material for sandblasting metal products in comparison with analogues used in production (coper slag, quartz sand, metal shot and electrocorundum). Research methods include optical microscopy, scanning electron microscopy and X-ray fluorescence spectroscopy. The steel plates were cleaned using a sandblaster. A profilometer was used to measure the surface roughness of the plates. The material characteristics of the abrasive sands studied in the article are given (crushing screenings of the Sedelnikovsky crushed stone quarry, coper slag, quartz sand, metal shot and electrocorundum). It has been established that the characteristics of common abrasive materials and technogenic formations used in terms of the quality of the resulting surface of steel plates after sandblasting are close to each other. The crushing screenings themselves belong to hazard class 4, have an average density (about 3.0 g/cm^3), and contain practically no harmful impurities (unlike quartz sand and cooper slag). The treated surface after applying crushing screenings has a smoother surface with a roughness index of Ra = 7.6 (for a fraction of 0.1–0.5 mm) compared to other abrasive sands. They have a roughness index of Ra up to 15.

Key words: crushing screening, cooper slag, quartz sand, metal shot, electrocorundum, steel plates, sandblast-ing, technogenic formations.

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ural State Mining University No. 075-03-2025-325 dated 01/16/2025.

For citation: Vlasov I. A., Fedorov S. A., Petrenko A. S. The possibility of using technogenic formations from the production of crushed stone as an abrasive material for sandblasting steel. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-1):62-77. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_62.

Введение

При рациональном подходе к недропользованию необходимо искать возможности вовлечения в производственную и хозяйственную деятельность всех продуктов, получаемых при отработке месторождения. В частности, при отработке нерудных месторождений природного камня в качестве побочного техногенного образования формируются отсевы дробления [1, 2]. Объемы данных образований значительны — до 50—60 млн м^3 в год [2, 3]. Поэтому, необходимо и целесообразно их реализовывать, вовлекая в хозяйственную деятельность.

В настоящее время основная доля исследований связана с анализом возможности применения отсевов дробления в строительной промышленности при производстве бетона или цемента [3—7].

В меньшей степени такие техногенные образования применяют для производства керамики [2, 8], шумоизоляци-

онных материалов [9], подкормки животных (мраморная крошка) [1].

Другим перспективным вариантом использования техногенных рыхлых зернистых материалов, получаемых при дроблении горных пород, является их применение в качестве абразивного материала при проведении пескоструйной очистки стальных и прочих изделий. Под пескоструйной обработкой принято считать очистку поверхностей путем воздействия песка в качестве шлифовального средства, который с помощью сжатого воздуха с высоким ускорением направляется на очищаемый объект через форсунку [10 — 12]. Процесс пескоструйной обработки применяется для очистки металлических поверхностей [12 — 16], изделий из камня, при матировании стекла для декоративных целей, при удалении остатков лаков и красок с древесины, при очистке предметов из пластика (зубных протезов, электронных деталей и т.д.), для удаления наслоений на бетоне, при очистке фасадов зданий, в кожевенной промышленности и во многих других отраслях [17 — 20].

В настоящее время наиболее распространенным материалом, применяемым при пескоструйной обработке поверхностей является купершлак [21, 22], в меньшей мере используются кварцевый песок [23 — 25], стальная дробь [23] и корунд [25 — 28]. В качестве нового материала предлагается использование отсева дробления основных магматических горных пород, в частности с Седельниковского карьера строительного камня. Потенциальным преимуществом применения отсевов дробления является практически полное отсутствие в их составе вредных компонентов и его относительно низкая себестоимость.

Цель настоящей работы заключалась в анализе возможности применения техногенных минеральных образований, а именно отсевов дробления Седельниковского щебеночного карьера (Средний Урал), в качестве абразивного материала для пескоструйной обработки стали.

Для проверки возможности применения отсевов дробления Седельниковского щебеночного карьера при пескоструйной обработке была разработана программа испытаний и проведены сравнительные исследования с другими абразивными песками.

Материалы
и методы исследования

В качестве абразивных материалов выбраны: купершлак (фракции 0,5 — 2,5 мм, 0,5 — 1,5 мм и 0,1 — 0,6 мм); кварцевый песок (фракции 0,1 — 0,63 мм и 0,4 — 0,8 мм); отсевы дробления Седельниковского карьера (фракции 0,5 — 1,0 мм, 0,1 — 0,5 мм и 1 — 3 мм); металлическая дробь (фракция 0,5 мм) и электрокорунд (фракция 0,1 — 0,5 мм).

В качестве загрязненных и требующих очистки образцов использовались стальные пластины размером порядка 300×300 мм, толщиной 10 мм, имеющие три вида загрязнений: поверхностную ржавчину; ржавчину с замасленностью; ржавчину, перекрытую алкидной краской.

Изучение формы зерен абразивных материалов, их минерального состава и поверхности испытываемых пластин стали осуществлялось на оптическом микроскопе Olympus BX61 с автоматизированным программным комплексом для минералогических исследований SIAMS «МинералС7» и на рентгеноструктурном анализаторе ADANI Pow DiX 600. Более детальное исследование поверхности зерен и их химический состав производилось на электронном сканирующем микроскопе TESCAN VEGA 4LMS с энергодисперсионной приставкой Oxford Instruments. Химический состав материалов также определялся на рентгенофлюоресцентном спектромет-

ре. Насыпную плотность измеряли путем взвешивания песка в мерных сосудах, а истинную плотность — путем взвешивания единицы объема высушенных зерен песка.

Для измерения шероховатости поверхности пластин стали применялся профилометр Mitutoyo Surftest SJ-210. Метод измерения, применяемый на данном приборе, основан на принципе ощупывания поверхности алмазной иглой (щупом) и преобразования возникающих при этом механическом колебаний щупа в изменения напряжения, пропорциональные этим колебаниям. Измерялись следующие характеристики. Профиль шероховатости (R-профиль) — определяется, как профиль, выделенный из исходного профиля подавлением длинноволновых составляющих, использующий профильный фильтр λ_c. Профиль шероховатости является базой для оценки параметров шероховатости. Ra — среднее арифметическое значение шероховатости или среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля от средней линии профиля шероховатости.

Программа испытаний. В связи с тем, что методика проведения подобного рода исследований авторами в открытом доступе не была найдена, было принято решение по составлению авторской программы испытаний, включающей в себя следующие этапы:

• Исследование химического, гранулометрического и минералогического состава абразивных материалов с целью установления форм и размеров зерен абразивных материалов, наличия вредных минеральных видов и химических соединений в составе абразивов.

• Подготовка образцов стали для проведения пескоструйной обработки с целью создания максимально идентичных объектов для пескоструйной обработки. Для этого из единой стальной пластины, имеющей сплошной слой коррозии, были вырезаны пластины одинаковых площадей. Часть пластин были покрашены алкидной краской и просушены до полного затвердевания краски. Часть пластин были покрыты машинным маслом.

• Проведение пескоструйной обработки загрязненных поверхностей с фиксацией времени необходимого для очистки загрязненной поверхности до необходимого качества, с целью установления расхода абразивного материала и скорости обработки. Выполнение данного этапа было бы наиболее подходящим проводить при помощи специализированных установок в автоматическом режиме, что позволило бы сделать обработку поверхностей более однообразной, однако для создания условий приближенных к реальности было принято решение данный этап проводить в «ручном» режиме специалистами по пескоструйной обработке, что позволяет в реальном времени отслеживать качество обработки поверхности и регулировать скорость проведения работ.

• Проведение исследований обработанной поверхности с целью установления качества проведенной обработки и различий в полученных поверхностях при применении различных абразивов.

• Проведение исследований отработанных материалов с целью установления возможности их повторного использования, фиксации изменений, возникающих при применении различных абразивных материалов в пескоструйной обработке.

Результаты и их обсуждение

Вещественная характеристика исследуемых абразивных материалов. По результатам оптической и электронной микроскопии установлен минеральный состав исследуемых абразивных материалов, который получился крайне раз-

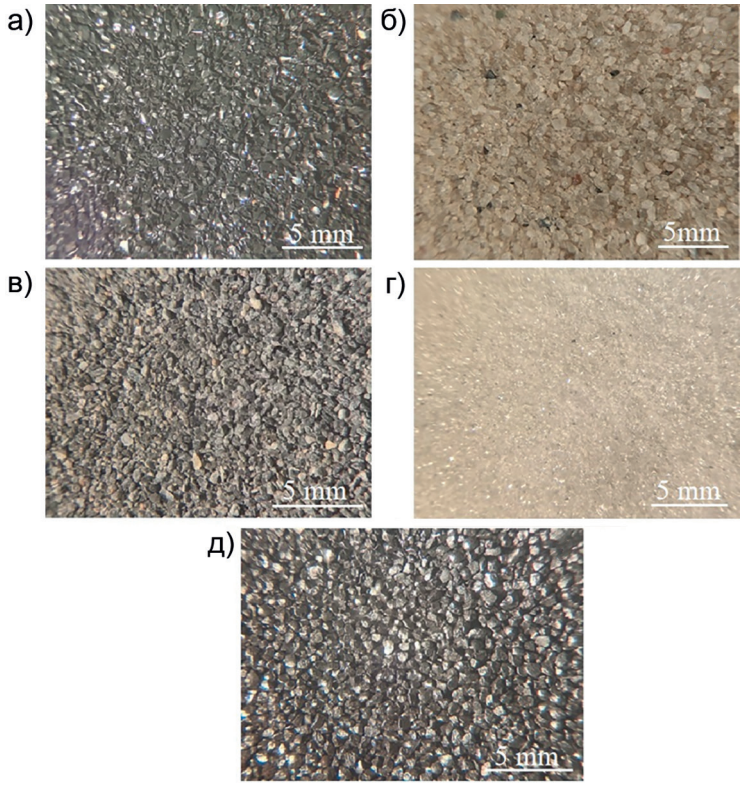

Рис. 1. Вид зерен абразивных песков класса крупности менее 0,5 мм: купершлак (а); кварцевый песок (б); отсевы дробления Седельниковского щебеночного карьера (в); электрокорунд (г); металлическая дробь (д)

Fig. 1. Type of grains of abrasive sands (a class of fineness less than 0.5 mm): copper slag (a); quartz sand (b); crushing screenings of the Sedelnikovsky crushed stone quarry (v); electrocorundum (g); metal shot (d)

личным. Образцы абразивного песка — кварца и отсевов дробления Седельниковского щебеночного карьера имеют природное происхождение. Купершлак, металлическая дробь и электрокорунд искусственно созданные. Форма большинства зерен в абразивных материалах изометричная, реже лещадная и уплощенная иногда встречаются слабосглаженные и гладкие края (рис. 1 и 2).

В минеральном плане отсевы дробления состоят из диопсида (52 — 57 мас.%), лабрадора (20 — 22 мас.%), оливина (2 — 5 мас.%), калиевых полевых шпатов (1 — 5 мас.%) рудных (магнетит 1 — 5 мас.%, ильменит 1 — 2 мас.%) и вторичных минералов (до 4 мас.%). Купершлак сложен преимущественно фаялитом (85 — 90 мас.%) в меньшей степени силикатным стеклом (10 — 15 мас.%), сульфидами железа и меди (до 1 мас.%). В кварцевый песок входят кварц (91 — 93 мас.%), полевые шпаты (2 — 5 мас.%) и прочие силикаты (2 — 4 мас.%). Остальные абразивные пески (металлическая дробь и электрокорунд) практически мономинеральные (более 99 мас.% стали и корунда соответственно).

Отсевы дробления Седельниковского щебеночного карьера имеют насыпную плотность 1,62 — 1,65 г/см^3 и истинную плотность 2,9 — 3,0 г/см^3. Эти результаты соответствуют средним значениям плотности для основных магматиче-

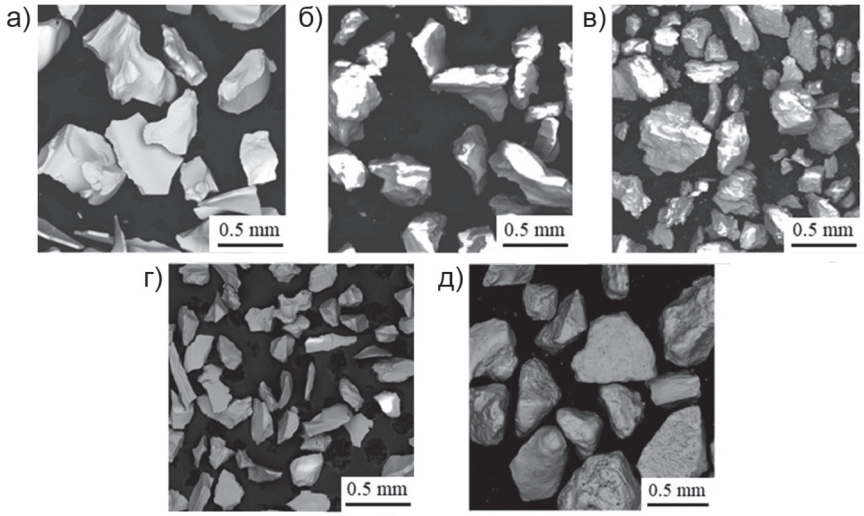

Рис. 2. Вид зерен абразивных материалов под сканирующим электронным микроскопом (режим съемки BSE): купершлак (а); кварцевый песок (б); отсевы дробления Седельниковского щебеночного карьера (в); электрокорунд (г); металлическая дробь (д)

Fig. 2. View of abrasive grains under a scanning electron microscope (BSE shooting mode): copper slag (a); quartz sand (b); crushing screenings of the Sedelnikovsky crushed stone quarry (v); electrocorundum (g); metal shot (d)

ских пород. Значения замеренной истинной и насыпной плотности остальных абразивных песков соответствуют справочными данными.

При химическом анализе абразивных песков (табл. 1) в качестве химических элементов, представляющих опасность, выявлены сера, медь, цинк и барий в купершлаке [29]. Однако содержание этих элементов не превышает предельнодопустимые нормы (в соответствии с СП 2.1.7.1386-03).

Пескоструйная очистка стальных пластин. При проведении исследования по пескоструйной очистке металлических поверхностей в качестве обрабатываемых материалов использованы плоские стальные пластины, покрытые ржавчиной, ржавчиной с маслом и ржавчиной с краской (рис. 3). Все это попадает под

Таблица 1

Химический состав исследуемых абразивных песков
Chemical composition of the studied abrasive sands

Наименование материала	Массовая доля элемента, %													
	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Ba
Купершлак	39,5	–	0,8	3,0	13,8	1,4	0,6	3,4	–	–	32,3	0,3	3,2	1,3
Кварцевый песок	62,5	–	0,2	3,2	33,2	–	–	–	–	–	0,6	–	–	–
Отсевы дробления Седельниковского щебеночного карьера	54,9	0,4	9,7	3,0	18,5	–	0,2	8,8	–	–	4,1	–	–	–
Стальная дробь	6,9	–	–	0,5	1,0	–	–	–	0,4	0,7	90,4	–	–	–
Электрокорунд	53,1	–	–	46,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

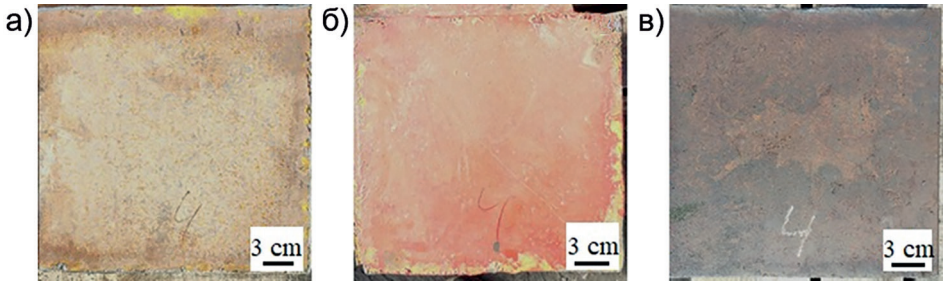

Рис. 3. Исходный вид стальных пластин: пластина с ржавчиной (а); пластина с ржавчиной и краской (б); пластина с ржавчиной и маслом (в)

Fig. 3. Initial view of steel plates: plate with rust (a); plate with rust and paint (b); plate with rust and oil (v)

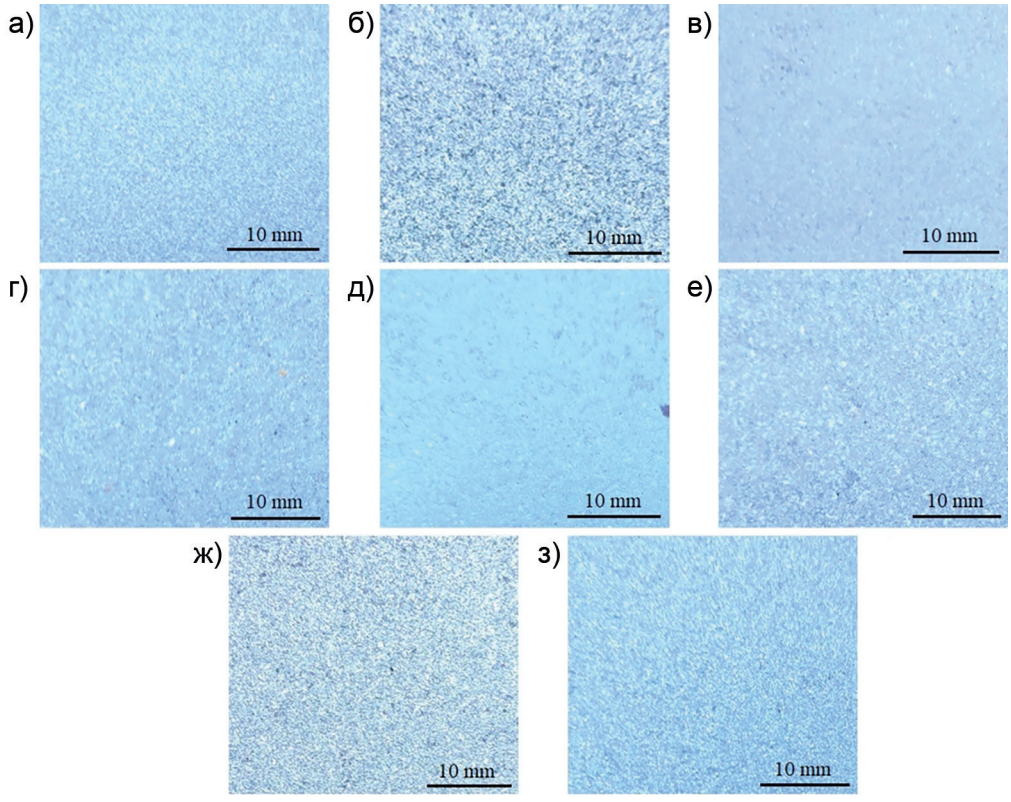

Рис. 4. Вид поверхностей стальных пластин после пескоструйной обработки: 1, 2 — купершлаком фракций 0,1—0,6 и 0,5—1,5 мм соответственно; 3, 4 — кварцевым песком фракций 0,1—0,6 и 0,4—0,8 мм соответственно; 5, 6 — отсевами дробления Седельниковского щебеночного карьера фракциями 0,1—0,5 и 0,5—1,0 мм соответственно; 7 — стальной дробью (фракция 0,5 мм); 8 — электрокорундом (фракция 0,1—0,5 мм).

Fig. 4. View of the surfaces of steel plates after sandblasting: 1, 2 — with copper slag fractions of 0.1—0.6 and 0.5—1.5 mm, respectively; 3, 4 — with quartz sand fractions of 0.1—0.6 and 0.4—0.8 mm, respectively; 5, 6 — with crushing screenings of Sedelnikovsky crushed stone quarry fractions of 0.1—0.5 and 0.5—1.0 mm, respectively; 7 — steel shot (0.5 mm fraction); 8 — electrocorundum (0.1—0.5 mm fraction)

первый тип загрязненной и тип С окисленной поверхности (в соответствии с ГОСТ Р ИСО 8501-1-2014).

Параметры обработки стальных пластин абразивным материалом следующие. В бак-приемник пескоструйного аппарата загружалось 20 кг абразивного песка. Одним абразивным материалом обрабатывались три металлические пластины без остановок. По окончанию обработки остаток абразива «выдувался» в отдельный бункер-приемник. Подавался абразивный материал с давлением 6,8 бар через сопло «двойной вентури» диаметром 6 мм. Расход воздуха составлял 5000 л/мин.

В результате опытов получены металлические пластины с зонами различного качества поверхности, согласно степеням абразивной струйной очистки [30]: 10% поверхности пластин оставлено в первоначальном виде; 40% поверхности пластин очищенно до состояния Sa 1 — 2; 50% поверхности пластин очищено до состояния Sa 2½ — 3. Для визуализации качества обработанной поверхности была проведена макросъемка обработанных поверхностей. Фотофиксация поверхности металлических пластин проводилась на цифровой фотоаппарат при естественном освещении, рассеянном свете, без фильтров (рис. 4). Состояние поверхности металла после пескоструйной обработки купершлаком, кварцевым песком и электрокорундом согласуется с результатами других исследователей [11, 17, 30].

Оптический анализ поверхностей показал, что все обрабатываемые поверхности имеют высокую степень очистки и поверхности обработанные «крупными» (с размером частиц абразива 0,5 мм и выше) фракциями абразивного песка имеют множества каверн размером до 1 мм в диаметре. Наиболее гладкие поверхности пластин наблюдаются после обработки отсевами дробления Седельниковского щебеночного карьера крупностью 0,1 — 0,5 мм. Наиболее грубые поверхности пластин отмечены после очистки купершлаком фракции 0,5 — 2,5 мм.

Результаты измерения показателя Ra поверхности при длине замера 2,5 мм

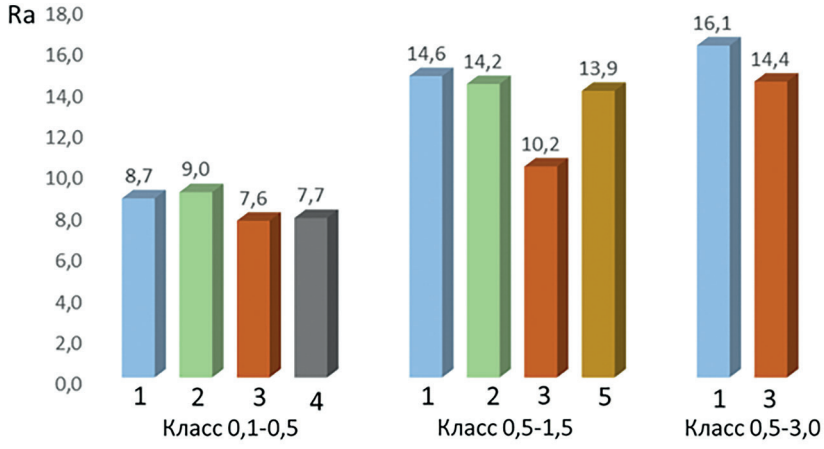

Рис. 5. Диаграмма сравнения показателя Ra обработанных поверхностей: 1 — купершлак; 2 — кварцевый песок; 3 — отсевы дробления Седельниковского щебечного карьера; 4 — электрокорунд; 5 — металлическая дробь

Fig. 5. Comparison diagram of the Ra index of treated surfaces: 1 — copper slag; 2 — quartz sand; 3 — crushing screenings of the Sedelnikovsky crushed stone quarry; 4 — electrocorundum; 5 — metal shot

указывают на то, что шероховатость поверхности ниже при обработке поверхностей абразивами более мелких классов крупности. Показатель шероховатости Ra находится в пределах от 7,6 до 16,1 в зависимости от абразивного материала и его крупности (см. рис. 5). Наиболее высокий показатель шероховатости Ra = 16,1 у поверхности, обработанной купершлаком фракцией 0,5 — 2,5 мм. Наиболее низкий показатель Ra = 7,6 — 7,7 у образцов, обработанных электрокорундом фракцией 0,1 — 0,5 мм и отсевами дробления Седельниковского щебеночного карьера фракцией 0,1 — 0,5 мм. Результаты как согласуются, так и различаются с литературными данными (для шлака, кварцевого песка и электрокорунда) [15, 17, 29], что связано с различными параметрами материалов и проведения опытов. Сравнительный анализ качества поверхностей после пескоструйной обработки различными абразивными песками показал, что применение отсевов дробления Седельниковского щебеночного карьера дает показатель Ra в среднем на 2 единицы ниже по сравнению с купершлаком.

Скорость обработки и расход абразивного материала. Скорость обработки и расход абразивного материала зависят от множества факторов, таких как: качества загрязненной поверхности, мастерства рабочего, необходимой степени очистки обрабатываемой поверхности, технических характеристик пескоструйного аппарата, сложности и рельефности поверхности и т.д. В настоящей работе скорость обработки и расход абразивного материала получены расчетным методом с учетом площади поверхности с качеством Sa 2 — 3, времени, потраченного на обработку поверхности и времени полного расхода 20 кг загруженного в пескоструйный аппарат исходного абразивного материала. Сравнительный анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

• Наибольшая скорость обработки поверхности достигнута при использовании кварцевого песка и составляет 3,6 — 4,7 м^2/ч (табл. 2).

• Наименьшая скорость обработки (2,2 м^2/ч) была получена при использовании стальной дроби. Незначительно выше скорость обработки при использо-

Таблица 2

Данные по скорости обработки и расходу абразивного материала
Data on the processing speed and consumption of abrasive material

Наименование абразивного материала	Фракция	Скорость обработки, м^2/ч	Расход материала, кг/мин	Расхода материала на площадь кг/м^2
Купершлак	0,5 — 2,5	3,4	4,5	81,4
	0,5 — 1,5	3,2	4,5	85,9
	0,1 — 0,6	2,9	4,7	98,1
Кварцевый песок	0,1 — 0,63	4,7	3,5	45,0
	0,4 — 0,8	3,6	3,2	54,9
Отсевы дробления Седельниковского щебеночного карьера	0,5 — 1,0	2,3	3,8	102,2
	0,1 — 0,5	2,4	3,7	92,2
	1 — 3	2,8	3,6	76,8
Стальная дробь	0,5	2,2	6,4	177,1
Электрокорунд	0,1 — 0,5	2,7	5,0	111,8

вании отсевов дробления Седельниковского щебеночного карьера 2,3 — 2,8 м²/ч и электрокорунда 2,7 м²/ч.

• Средняя скорость обработки поверхности при использовании купершлака составила 3,1 м²/ч.

• Наибольший расход абразива 177 кг/м² зафиксирован при использовании стальной дроби, значительно меньше, порядка 111 кг/м² расход при использовании электрокорунда. Расход абразива при использовании отсевов дробления Седельниковского щебеночного карьера и купершлака изменяется от 77 до 102 кг/м².

• Наименьший расход абразива (порядка 45 — 55 кг/м²) зафиксирован при использовании кварцевого песка.

Для более точного подсчета скорости обработки и расхода абразива необходимо проводить более масштабные исследования. Но даже на основании полученных данных можно сделать вывод, что отсевы дробления Седельниковского карьера имеют средние показатели расхода материала и скорости обработки, соизмеримые с другими абразивными материалами.

Анализ возможности рециклинга абразивных материалов. Для оценки воз-

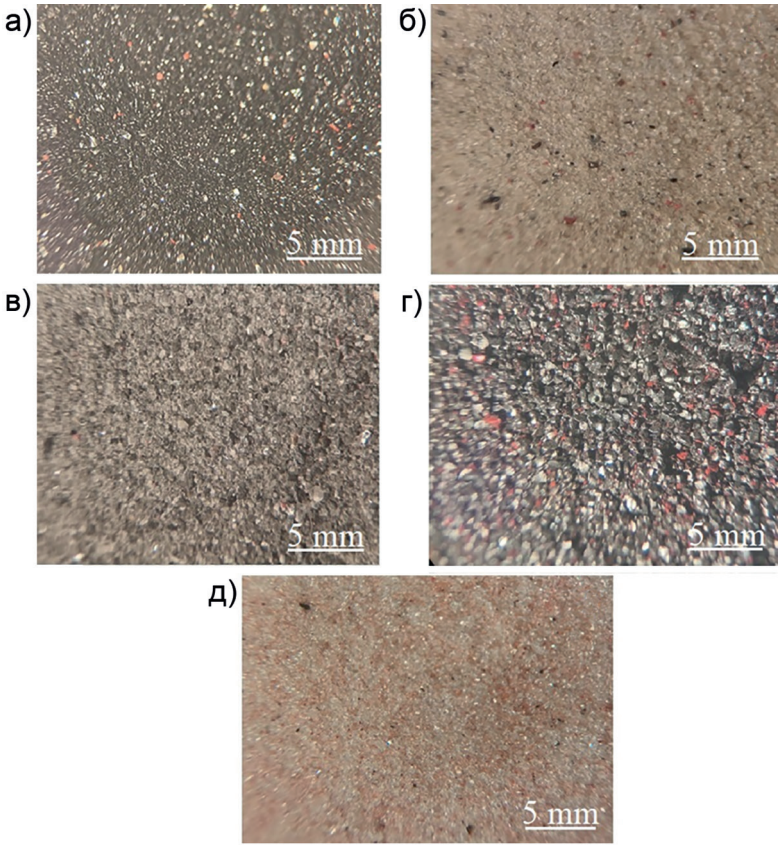

Рис. 6. Абразивные пески после пескоструйной обработки стали (фракции менее 0,5 мм): купершлак (а); кварцевый песок (б); отсевы дробления Седельниковского щебеночного карьера (в); металлическая дробь (г); электрокорунд (д)

Fig. 6. Abrasive sands after sandblasting of steel (fractions less than 0.5 mm): copper slag (a); quartz sand (b); crushing screenings of the Sedelnikovsky crushed stone quarry (v); metal shot (g); electrocorundum (d)

Таблица 3

Зерновой состав отработанных абразивных материалов
Grain composition of used abrasive materials

Наименование пробы	Фракция мм	Класс крупности, мм						
		+3	–3+2	–2+1	–1+0,5	–0,5+0,25	–0,25+0,1	–0,1
Купершлак	0,5 — 2,5	0,3	1,1	11,8	18,0	28,4	21,8	18,6
	0,5 — 1,5	—	0,1	2,9	17,5	32,7	26,0	20,9
	0,1 — 0,6	—	—	—	0,1	13,4	12,3	74,2
Кварцевый песок	0,1 — 0,63	—	—	—	0,1	9,2	48,8	41,8
	0,4 — 0,8	—	—	0,3	4,7	23,6	40,6	30,8
Отсевы дробления Седельниковского щебеночного карьера	0,5 — 1,0	—	—	0,4	7,5	31,1	31,4	29,6
	0,1 — 0,5	—	—	—	0,1	11,9	35,3	52,8
	1 — 3	0,6	5,2	19,2	20,0	23,4	16,3	15,3
Металлическая дробь	0,5	—	1,8	6,4	21,0	59,3	9,0	2,5
Электрокорунд	0,1 — 0,5	—	—	—	—	2,4	73,9	23,6

можности рециклинга исследуемых абразивных материалов был проведен сбор отработанных абразивных материалов и их последующий анализ. Все отработанные абразивные материалы имеют значительные загрязнения в виде кусков краски, ржавчины, масленых пленок тонких пылеватых фракций (см. рис. 6). Зерна в пробах частично коагулируются с образованием слабосвязанных агрегатов.

Зерновой состав определяется методом рассева проб на лабораторных ситах с квадратными ячейками размером: 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,1 мм с последующим взвешиванием фракций на лабораторных весах. В сравнении с исходным гранулометрическим составом крупность зерен каждого абразивного песка уменьшилась как минимум на четверть. Сильнее всего измельчилась фракция 0,1 — 0,6 мм купершлака (74,2 мас.% в классе — 0,1 мм) и фракция 0,1 — 0,5 отсевов дробления Седельниковского щебеночного карьера (52,8 мас.% в классе –0,1 мм). Исключением является металлическая дробь, крупность зерен которого мало изменилась (табл. 3).

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что все абразивные материалы могут быть частично восстановлены и повторно использованы. Наиболее сохранившимся абразивным материалом является металлическая дробь. Для рециклинга и повторного использования материалов необходимо проводить классификацию и очистку материалов от механических и масленых загрязнений. Исходя из экономической ситуации и высокой плановой себестоимости процесса очистки абразивных материалов, наиболее целесообразно проводить рециклинг только стальной дроби.

При отсутствии технической возможности повторного использования абразивных материалов при пескоструйной обработке, купершлак, кварцевый песок, отсевы дробления Седельниковского щебеночного карьера и электрокорунд могут рассматриваться как материалы для строительных работ, добавки к бетонам и другим строительным смесям.

Заключение

В работе изучены наиболее распространенные абразивные материалы, при-

меняемые при пескоструйной обработке, и, в частности, новый материал — отсевы дробления основных магматических горных пород Седельниковского щебеночного карьера. Проведены опыты по обработке стальных пластин с различным характером загрязнения абразивными материалами различной крупности, выполнены анализы качества металлической поверхности после пескоструйной обработки, отработана методика проведения опыта и дальнейшего сравнительного анализа материалов.

Установлено, что характеристики применяемых в данной работы распространенных абразивных материалов (купершлак, кварцевый песок, металлическая дробь, электрокорунд) и техногенных образований (отсевы дробления Седельниковского щебеночного карьера) по качеству полученной поверхности стальных пластин после пескоструйной обработки близки между собой. Сами отсевы дробления относятся к 4 классу опасности, имеют среднюю плотность (около 3,0 г/см^3), невысокий показатель Ra для фракции 0,1 — 0,5 мм (7,6) в сравнении с другими абразивными песками (от 7,7 до 13,9), не содержат вредных примесей (в отличие от кварцевого песка и купершлака).

Планируются дальнейшие работы по изучению применения отсевов дробления Седельниковского щебеночного карьера.

В качестве основного направления исследования следует в первую очередь проверить характеристики, получаемой при пескоструйной обработке поверхности отсевами дробления, мягких и тонких металлов таких как медь, алюминий, жесть; пластик; каменный материал, применяемый в облицовке (гранит, мрамор).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Генкель А. В.*, *Гришин И. А.*, *Бурмистров К. В.*, *Великанов В. С.* Повышение эффективности производства щебня и способы применения отсевов дробления // Горная промышленность. — 2015. — № 6. — С. 64 — 64.

2. *Бурученко А. Е.*, *Харук Г. Н.*, *Сергеев А. А.* Использование отсевов дробления известковых пород в керамическом производстве // Строительные материалы. — 2019. — № 9. — С. 22 — 27. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-22-27.

3. *Хафизова Э. Н.*, *Панченко Ю. Ф.*, *Панченко Д. А.* Применение технологических отходов дробления горных пород при разработке составов цементных бетонов // Вестник СибАДИ. — 2021. — Т. 18. — № 6. — С. 790 — 799. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-6-790-799.

4. *Benarchid Y., Taha Y., Argane R., Benzaazoua M.* Application of Quebec recycling guidelines to assess the use feasibility of waste rocks as construction aggregates // Resources Policy. 2018, vol. 59, pp. 68 — 76. DOI: 10.1016/j.resourpol.2018.01.004.

5. *Barbudo A., Agrela F., Ayuso J.*, *Jiménez J. R.*, *Poon C. S.* Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications // Construction and Building Materials. 2012, vol. 28, no. 1, pp. 129 — 138. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.035.

6. *Kang M. S.*, *Lee K. H.*, *Suh Y. C.*, *Kim I. S.* Application of screenings by-product of crushing rock in quarry as lean concrete pavement // Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute. 2012, vol. 6, no. 4, pp. 75 — 81.

7. *Касторных Л. И.*, *Крюков П. С.* Комплексное использование отсевов дробления при производстве сборных железобетонных изделий // Молодой исследователь Дона. — 2021. — Т. 32. — № 5. — С. 44 — 51.

8. *Moretti E., Belloni E., Agosti F.* Innovative mineral fiber insulation panels for buildings: Thermal and acoustic characterization // Applied Energy. 2016, vol. 169, pp. 421 — 432. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.048.

9. *Заева А. Г.*, *Полозов В. С.* Перспективы использования отсевов дробления в производстве звукоизоляционных панелей / IX Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации». — СПб., 2023. — С. 280—284.

10. *Бинь М., Сяобин Ч., Лу С., Куньси В., Цзин Х.* Повышение коррозионной стойкости азотированной в плазме тлеющего разряда стали AISI 1045 с помощью предварительной пескоструйной обработки // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2018. — № 12. — С. 52—57.

11. *Horodek P.*, *Eseev M. K.*, *Kobets A. G.* Studies of stainless steel exposed to sandblasting // Nukleonika. 2015, vol. 60, pp. 721—724. DOI: 10.1515/nuka-2015-0129.

12. *Bechikh A., Klinkova O., Maalej Y., Tawfiq I., Nasri R.* Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2020, vol. 102, article 102653. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102653.

13. *Liebman A. J.* Surface preparation values and sandblasting economics // Corrosion. 1950, vol. 6, no. 5, pp. 151—157. DOI: 10.5006/0010-9312-6.5.151.

14. *Gu W. F.*, *Diao J., Liu L., Ge W. S., Li H. Y., Xie B.* Investigation of properties of air-quenched steel slag as sandblasting abrasive // JOM. 2021, vol. 73, no. 10, pp. 2995—2999. DOI: 10.1007/s11837-021-04819-3.

15. *Азизов Р. О.*, *Вохидов А. А.*, *Мирзамидинов И. М.*, *Дододжонов М.* Повышение качества поверхности стальных деталей пескоструйной обработкой // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. — 2019. — № 1. — С. 103—109.

16. *Полянский С. Н.*, *Бутаков С. В.*, *Александров В. А.*, *Ольков И. С.* Обработка поверхности струйными методами // Аграрный вестник Урала. — 2015. — Т. 142. — № 12. — С. 43—47.

17. *Шахрей А. О.*, *Шаталина Е. Д.*, *Куц Л. Е.* Сравнительный анализ влияния пескоструйной и лазерной импульсной обработки на получение адгезионно-прочных функциональных покрытий на поверхности нержавеющей стали / Вторая Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов». — Курск, 2021. — С. 100—104.

18. *Fatuyi O. A.*, *Aliu E. T.* Glass surface decoration by sandblasting technique: A case study // Arts and Design Studies. 2019, pp. 19—26.

19. *Зайнуллина Л. И.*, *Фаррахов Р. Г.*, *Рамазанов И. А.*, *Хаматдинов Р. З.*, *Дюрягин В. С.*, *Парфенов Е. В.* Влияние пескоструйной обработки и плазменно-электролитического оксидирования на качество поверхности дентальных имплантатов // Современные технологии в медицине. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 40—48. DOI: 10.17691/stm2023.15.6.05.

20. *Rescic S., Tiano P., Fratini F., Manganelli Del Fà R.* The micro-sandblasting technique as a new tool for the evaluation of the state of conservation of natural stone and mortar surfaces // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2013, vol. 17, no. 2, pp. 113—127. DOI: 10.1080/19648189.2012.751227.

21. *Stephenson D., Spear T., Seymour M., Cashell L.* Airborne exposure to heavy metals and total particulate during abrasive blasting using copper slag abrasive // Applied Occupational and Environmental Hygiene. 2002, vol. 17, no 6, pp. 437—443.

22. *Минязев Д. В.* Абразивные материалы для пескоструйной обработки // Наука и образование сегодня. — 2017. — Т. 17. — № 6. — С. 30—34.

23. *Ковалев И. В.* Пескоструйная и абразивоструйная обработка с применением роботизированных технологий // Инновационные технологии в машиностроении, образовании и экономике. — 2020. — Т. 27. — № 2. — С. 29—31.

24. *Krupicz B., Tarasiuk W.*, *Barsukov V. G.*, *Sviridenok A. I.* Experimental evaluation of the influence of mechanical properties of contacting materials on gas abrasive wear of steels in sandblasting systems // Journal of Friction and Wear. 2020, vol. 41, pp. 1—5. DOI: 10.3103/S1068366620010110.

25. *Zulkarnain I., Mohamad Kassim N. A., Syakir M. I., Abdul Rahman A., Md Yusuff M. S., Mohd Yusop R.*, *Keat N. O.* Sustainability-based characteristics of abrasives in blasting industry // Sustainability. 2021, vol. 15, no. 13, p. 8130. DOI: 10.3390/su13158130.

26. *Balza J. C.*, *Zujur D., Gil L., Subero R., Dominguez E., Delvasto P., Alvarez J.* Sandblasting as a surface modification technique on titanium alloys for biomedical applications: abrasive particle behavior // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2013, vol. 45, no. 1, article 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/45/1/012004.

27. *Kern M., Thompson V. P.* Effects of sandblasting and silica-coating procedures on pure titanium // Journal of Dentistry. 1994, vol. 22, no. 5, pp. 300 — 306. DOI: 10.1016/0300-5712(94)90067-1.

28. *Guerrero-Vaca G., Carrizo-Tejero D., Rodríguez-Alabanda Ó., Romero P. E., Molero E.* Experimental study for the stripping of PTFE coatings on Al-Mg substrates using dry abrasive materials // Materials. 2020, vol. 13, no. 3, article 799. DOI: 10.3390/ma13030799.

29. *Hubbs A. F., Minhas N. S., Jones W., Greskevitch M., Battelli L. A., Porter D. W., Goldsmith W. T., Frazer D., Landsittel D. P., Ma J. Y. C., Barger M., Hill K., Schwegler-Berry D., Robinson V. A., Castranova V.* Comparative pulmonary toxicity of 6 abrasive blasting agents // Toxicological Sciences. 2011, vol. 61, no. 1, pp. 135 — 143. DOI: 0.1093/toxsci/61.1.135.

30. *Нетета С. В., Сарсенгалиев А. М.* Исследование влияния воздушно-абразивной обработки и лазерного модифицирования поверхности на эффективность нанесения адгезионно-прочных функциональных покрытий / XVII Международная научно-практическая конференция «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации». — Курск, 2022. — С. 308 — 314. ГИАБ

REFERENCES

1. Genkel A. V., Grishin I. A., Burmistrov K. V., Velikanov V. S. Improving the efficiency of crushed stone production and methods of using crushing screening. *Russian Mining Industry Journal*. 2015, no. 6, pp. 64 — 64. [In Russ].

2. Buruchenko A. E., Kharuk G. N., Sergeev A. A. The use of calcareous rock crushing screening in ceramic production. *Stroitel'nye Materialy*. 2019, no. 9, pp. 22 — 27. [In Russ]. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-22-27.

3. Khafizova E. N., Panchenko Yu. F., Panchenko D. A. The use of technological waste from crushing rocks in the development of cement concrete compositions. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021, vol. 18, no. 6, pp. 790 — 799. [In Russ]. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-6-790-799.

4. Benarchid Y., Taha Y., Argane R., Benzaazoua M. Application of Quebec recycling guidelines to assess the use feasibility of waste rocks as construction aggregates. *Resources Policy*. 2018, vol. 59, pp. 68 — 76. DOI: 10.1016/j.resourpol.2018.01.004.

5. Barbudo A., Agrela F., Ayuso J., Jiménez J. R., Poon C. S. Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials*. 2012, vol. 28, no. 1, pp. 129 — 138. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.035.

6. Kang M. S., Lee K. H., Suh Y. C., Kim I. S. Application of screenings by-product of crushing rock in quarry as lean concrete pavement. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*. 2012, vol. 6, no. 4, pp. 75 — 81.

7. Kastornykh L. I., Kryukov P. S. Complex use of crushing screening in the production of precast reinforced concrete products. *Molodoy issledovatel' Dona*. 2021, vol. 32, no. 5, pp. 44 — 51. [In Russ].

8. Moretti E., Belloni E., Agosti F. Innovative mineral fiber insulation panels for buildings: Thermal and acoustic characterization. *Applied Energy*. 2016, vol. 169, pp. 421 — 432. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.048.

9. Zaeva A. G., Polozov V. S. Prospects of using crushing screening in the production of sound insulation panels. *IX Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Zashchita ot povyshennogo shuma i vibratsii»* [IX All-Russian scientific and practical conference with international participation «Protection from increased noise and vibration»], Saint-Petersburg, 2023, pp. 280 — 284. [In Russ].

10. Bin M., Xiaobing C., Lu S., Kinxia V., Jin H. Increasing the corrosion resistance of AISI 1045 steel nitrided in glow discharge plasma by pre-sandblasting. *Metal science and heat treatment*. 2018, no. 12, pp. 52 — 57. [In Russ].

11. Horodek P., Eseev M. K., Kobets A. G. Studies of stainless steel exposed to sandblasting. *Nukleonika*. 2015, vol. 60, pp. 721 — 724. DOI: 10.1515/nuka-2015-0129.

12. Bechikh A., Klinkova O., Maalej Y., Tawfiq I., Nasri R. Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020, vol. 102, article 102653. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102653.

13. Liebman A. J. Surface preparation values and sandblasting economics. *Corrosion*. 1950, vol. 6, no. 5, pp. 151 — 157. DOI: 10.5006/0010-9312-6.5.151.

14. Gu W. F., Diao J., Liu L., Ge W. S., Li H. Y., Xie B. Investigation of properties of air-quenched steel slag as sandblasting abrasive. *JOM*. 2021, vol. 73, no. 10, pp. 2995 — 2999. DOI: 10.1007/s11837-021-04819-3.

15. Azizov R. O., Vakhidov A. A., Mirzamidinov I. M., Dadajonov M. Improving the surface quality of steel parts by sandblasting. *Polytechnic bulletin. Series: Engineering studies*. 2019, no. 1, pp. 103 — 109. [In Russ].

16. Polyansky S. N., Butakov S. V., Alexandrov V. A., Olkov I. S. Surface treatment by jet methods. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2015, vol. 142, no. 12, pp. 43 — 47. [In Russ].

17. Shakhray A. O., Shatalina E. D., Kutz L. E. Comparative analysis of the effect of sandblasting and laser pulse treatment on the production of adhesive-resistant functional coatings on the surface of stainless steel. *Vtoraya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sovremennye problemy i napravleniya razvitiya metallovedeniya i termicheskoy obrabotki metallov i splavov»* [2nd International Scientific and Technical Conference «Modern problems and directions of development of metal science and heat treatment of metals and alloys»], Kursk, 2021, pp. 100 — 104. [In Russ].

18. Fatuyi O. A., Aliu E. T. Glass surface decoration by sandblasting technique: A case study. *Arts and Design Studies*. 2019, pp. 19 — 26.

19. Zainullina L. I., Farrakhov R. G., Ramazanov I. A., Khamatdinov R. Z., Duryagin V. S., Parfenov E. V. The effect of sandblasting and plasma electrolytic oxidation on the surface quality of dental implants. *Modern Technologies in Medicine*. 2023, vol. 15, no. 6, pp. 40 — 48. [In Russ]. DOI: 10.17691/stm2023.15.6.05.

20. Rescic S., Tiano P., Fratini F., Manganelli Del Fà R. The micro-sandblasting technique as a new tool for the evaluation of the state of conservation of natural stone and mortar surfaces. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2013, vol. 17, no. 2, pp. 113 — 127. DOI: 10.1080/19648189.2012.751227.

21. Stephenson D., Spear T., Seymour M., Cashell L. Airborne exposure to heavy metals and total particulate during abrasive blasting using copper slag abrasive. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*. 2002, vol. 17, no 6, pp. 437 — 443.

22. Minyazev D. V. Abrasive materials for sandblasting. *Nauka i obrazovanie segodnya*. 2017, vol. 17, no. 6, pp. 30 — 34. [In Russ].

23. Kovalev I. V. Sandblasting and abrasive blasting using robotic technologies. *Innovacionnye texnologii v mashinostroenii, obrazovanii i ekonomike*. 2020, vol. 27, no. 2, pp. 29 — 31. [In Russ].

24. Krupicz B., Tarasiuk W., Barsukov V. G., Sviridenok A. I. Experimental evaluation of the influence of mechanical properties of contacting materials on gas abrasive wear of steels in sandblasting systems. *Journal of Friction and Wear*. 2020, vol. 41, pp. 1 — 5. DOI: 10.3103/S1068366620010110.

25. Zulkarnain I., Mohamad Kassim N. A., Syakir M. I., Abdul Rahman A., Md Yusuff M. S., Mohd Yusop R., Keat N. O. Sustainability-based characteristics of abrasives in blasting industry. *Sustainability*. 2021, vol. 15, no. 13, p. 8130. DOI: 10.3390/su13158130.

26. Balza J. C., Zujur D., Gil L., Subero R., Dominguez E., Delvasto P., Alvarez J. Sandblasting as a surface modification technique on titanium alloys for biomedical applications: abrasive particle behavior. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2013, vol. 45, no. 1, article 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/45/1/012004.

27. Kern M., Thompson V. P. Effects of sandblasting and silica-coating procedures on pure titanium. *Journal of Dentistry*. 1994, vol. 22, no. 5, pp. 300 — 306. DOI: 10.1016/0300-5712(94)90067-1.

28. Guerrero-Vaca G., Carrizo-Tejero D., Rodríguez-Alabanda Ó., Romero P. E., Molero E. Experimental study for the stripping of PTFE coatings on Al-Mg substrates using dry abrasive materials. *Materials*. 2020, vol. 13, no. 3, article 799. DOI: 10.3390/ma13030799.

29. Hubbs A. F., Minhas N. S., Jones W., Greskevitch M., Battelli L. A., Porter D. W., Goldsmith W. T., Frazer D., Landsittel D. P., Ma J. Y. C., Barger M., Hill K., Schwegler-Berry D., Robinson V. A., Castranova V. Comparative pulmonary toxicity of 6 abrasive blasting agents. *Toxicological Sciences*. 2011, vol. 61, no. 1, pp. 135 — 143. DOI: 0.1093/toxsci/61.1.135.

30. Neteta S. V., Sarsengaliev A. M. Investigation of the effect of air-abrasive treatment and laser surface modification on the effectiveness of adhesive-resistant functional coatings. *XVII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii»* [XVII International Scientific and Practical Conference «Modern Instrumental Systems, Information Technologies and Innovations»], Kursk, 2022, pp. 308 — 314. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Власов Игорь Александрович[1] — младший научный сотрудник, e-mail: vlasovbkpost@bk.ru, ORCID ID: 0009-0002-1842-8497,
Федоров Сергей Андреевич[1] — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; старший научный сотрудник, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина УрО РАН, e-mail: saf13d@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4201-5177,
Петренко Артур Сергеевич — директор, ООО «Седельниковский щебеночный карьер», e-mail: 2006099@mail.ru,
[1] Уральский государственный горный университет.
Для контактов: Федоров С.А., e-mail: saf13d@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.A. Vlasov[1], Junior Researcher, e-mail: vlasovbkpost@bk.ru, ORCID ID: 0009-0002-1842-8497,
S.A. Fedorov[1], Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher; Senior Researcher, Vatolin Institute of Metallurgy of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 620016, Ekaterinburg, Russia, e-mail: saf13d@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4201-5177,
A.S. Petrenko, Director, LLC «Sedel'nikovskij shhebenochnyj kar'er», 620016, Ekaterinburg, Russia, e-mail: 2006099@mail.ru,
[1] Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.
Corresponding author: S.A. Fedorov, e-mail: saf13d@mail.ru.

Получена редакцией 24.07.2025; получена после рецензии 14.10.2025; принята к печати 10.11.2025.
Received by the editors 24.07.2025; received after the review 14.10.2025; accepted for printing 10.11.2025.