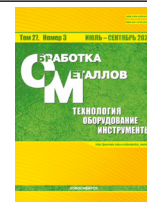




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Влияние способа измельчения на коэффициент формы зерен карбида кремния черного

Владимир Носенко^{1, а, *}, Даниэль Ривас Перес^{2, b}, Алексей Александров^{1, c}, Александр Саразов^{1, d}

¹ Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, ул. Энгельса 42а, г. Волжский, 404120, Россия

² ОАО «Волжский абразивный завод», ул. Ф.Г. Логинова, 169, г. Волжский, 404119, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0002-5074-1099>, vladim.nosenko2014@yandex.ru; ^b <https://orcid.org/0009-0000-7733-236X>, rivas-peres_de@vabz.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0003-1986-9139>, alexalexal2011@yandex.ru; ^d <https://orcid.org/0009-0007-3052-5691>, sarazov_av@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.921:661.683.1

История статьи:

Поступила: 21 апреля 2025

Рецензирование: 05 мая 2025

Принята к печати: 05 августа 2025

Доступно онлайн: 15 сентября 2025

Ключевые слова:

Карбид кремния черный

Фракции, способы измельчения

Длина

Ширина

Коэффициент формы

Законы распределения

Корреляционный и регрессионный анализ

Изометричные и игольчатые зерна

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке ОАО «Волжский абразивный завод», договор № 4990/02/2024-13/48-24.

АННОТАЦИЯ

Введение. Единственным в России и самым крупным в Европе производителем карбида кремния является ОАО «Волжский абразивный завод». Для измельчения абразивного материала на предприятии используют различные способы, оборудование и технологии, влияющие на геометрические параметры зерен. Наиболее значимыми и распространенными методами измельчения карбида кремния в действующем производстве служат пресс-валковый и роторный. **Цель работы:** исследование влияния пресс-валкового и роторного методов измельчения карбида кремния черного, реализуемых в условиях ОАО «Волжский абразивный завод», на коэффициент формы, длину и ширину зерен в выборках фракций. **Методы исследования.** Исходный материал, полученный в соответствии с действующим технологическим процессом, отбирали после дробления на стержневой мельнице. Одну пробу измельчали пресс-валковым методом, другую роторным. Измельченный карбид кремния рассевали на фракции ситовым анализатором Ro-Tap. Геометрические параметры и форму зерен определяли в пяти фракциях, в каждой фракции измеряли 800 зерен. Горизонтальную проекцию профиля зерен получали на оптическом стереоскопическом микроскопе «Альтами» СМ0870-Т. Для обработки проекций и определения геометрических параметров использовали специальное программное обеспечение. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что коэффициент формы и длина зерен подчиняются закону максимального значения, а ширина – закону нормального распределения. Сила связи между геометрическими параметрами изменяется от слабой до высокой, направленность связей – от положительной до отрицательной. Приведены графические зависимости, свидетельствующие о корреляционных и регрессионных связях между геометрическими параметрами зерен во фракциях. После роторного измельчения количество изометричных зерен, по сравнению с пресс-валковым, возрастает в среднем на 5 %, количество игольчатых зерен снижается в 3 раза. Результаты исследований предназначены для оптимизации рецептуры и технологии изготовления абразивных и огнеупорных изделий.

Для цитирования: Влияние способа измельчения на коэффициент формы зерен карбида кремния черного / В.А. Носенко, Д.Э. Ривас Перес, А.А. Александров, А.В. Саразов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 108–121. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-108-121.

Введение

Форма зерен шлифовальных порошков оказывает существенное влияние на свойства абразивного инструмента и качество обработанной

поверхности деталей машин [1–3] и является одним из определяющих показателей при изготовлении огнеупорных изделий [4, 5]. Зерна изометричной формы способствуют снижению износа, повышению стойкости абразивного инструмента и производительности обработки [6–9].

Зерна получают заданные размер и форму в результате технологического процесса, включающего в себя многостадийное дробление и измельчение абразивного материала. Операции выполняют на различном оборудовании с при-

*Адрес для переписки

Носенко Владимир Андреевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, ул. Энгельса 42а, 404120, г. Волжский, Россия
Тел.: +7 904 403-31-74, e-mail: vladim.nosenko2014@yandex.ru

менением разных способов дробления: щекового, шарового, конусного, стержневого, валкового (пресс-валкового), роторного и др. [10–16]. При необходимости сортировки по форме измельченные зерна подвергают дополнительной обработке [17–21].

Наиболее распространенным количественным критерием формы зерен абразивных материалов является коэффициент формы, равный отношению длины l проекции зерна на горизонтальную плоскость к ширине b . Здесь длина – наибольшее расстояние между точками периметра (максимальный диаметр Ферета), ширина – сумма наибольших расстояний от линии длины до левой и правой сторон периметра, разделенных линией длины (ISO 9276-6–2008, ГОСТ Р 70336–2022). Фактически проекция зерна вписана в прямоугольник, в котором наибольшая сторона соответствует размеру длины зерна, а наименьшая – ширине.

Способы дробления и измельчения абразивных материалов оказывают значимое влияние на форму и свойства частиц. Например, при измельчении корунда на валковой, конусной и шаровой дробилках показано, что наибольшую изометричность обеспечивает шаровая дробилка [11, 12].

Особый интерес представляет изучение влияния способов измельчения на геометрические параметры и форму зерен в действующем технологическом процессе производства абразивных материалов на ведущем предприятии отрасли ОАО «Волжский абразивный завод» (ОАО «ВАЗ»). Об актуальности исследований свидетельствует и тот факт, что ОАО «Волжский абразивный завод» является «единственным производителем карбида кремния в России и самым крупным в Европе» [22].

Из карбида кремния изготавливают шлифовальные порошки и микропорошки, широкий ассортимент абразивных инструментов и огнеупоров, а также специальные изделия. Перечисленная продукция предназначена для абразивной обработки различных деталей и изготовления широкого ассортимента изделий, поэтому единых требований к геометрическим параметрам и форме зёрен быть не может. Необходимо учитывать особенности обрабатываемой поверхности и свойства изделий.

Например, на операции отрезки для повышения производительности процесса используют

отрезные круги, изготовленные из шлифовальных порошков, коэффициент формы которых $K_{\phi} = l/b = 2,2$, где l и b – соответственно длина и ширина зерна. Если приоритетом является минимальный расход абразивного инструмента, то применяют изометричные зерна ($l/b = 1,3$) [23].

Для измельчения карбида кремния на предприятии используют различные способы, оборудование и режимы обработки, влияющие на геометрические параметры и свойства зёрен. Одними из наиболее распространенных способов измельчения, реализуемых на ОАО «Волжский абразивный завод», служат пресс-валковый и роторный.

Размеры зерен изменяются в широких пределах. Например, ГОСТ Р 52381–2005 определяет диапазон зернистостей и фракций, в которых размеры зерен изменяются от 4750 до 45 мкм. По зерновому составу шлифовальные порошки делятся на 30 зернистостей по 5 фракций в каждой.

Цель работы: исследование влияния пресс-валкового и роторного способов измельчения карбида кремния черного, реализуемых в условиях ОАО «Волжский абразивный завод», на коэффициент формы зёрен в выборках фракций.

Задачи: определить законы распределения коэффициентов формы зёрен карбида кремния черного и определяющих его геометрических параметров (длины и ширины зёрен); корреляционные и регрессионные связи между ними; закономерности изменения геометрических параметров зерен в выборках фракций, полученных пресс-валковым и роторным способами измельчения.

Методика исследований

Исходные материалы для пресс-валкового и роторного измельчения изготовлены в одинаковых условиях согласно действующему технологическому процессу. Куски карбида кремния черного последовательно обрабатывали в конусной дробилке и стержневой мельнице.

После сушки часть абразивного материала измельчали пресс-валковым способом, а оставшуюся часть – роторным.

Пресс-валковый измельчитель модели ПВИ 800/150, используемый на ОАО «ВАЗ», имеет следующие отличительные характеристики: ре-

гулируемое гидравлическое давление оказывает только на один валок, что позволяет избежать переизмельчения (чрезмерного измельчения); измельчение материала происходит в регулируемом слое между валками. Режим измельчения: частота вращения – 50 Гц, давление – 28 кг/см³, зазор между валками – 2 мм.

Центробежная роторная дробилка VSI Bar-mac 5100SE VSI работает по принципу «камень о камень», скорость вращения ротора составляет 3000 об/мин, производительность – 4 тонны в час. Футеровочные карманы помольной камеры наполнены спрессованным карбидом кремния, что позволяет существенно снизить помол металла и увеличить количество изометричных зёрен. В обычных условиях измельчение сопровождается образованием большого количества мелких частиц карбида кремния (пыль), поэтому в помольную камеру встроена система удаления пыли, что необходимо для обеспечения требуемого качества абразивных зерен согласно ГОСТ Р 52381.

Фракции исходных материалов получали рассевом порошков на машине Ro-Tap. Для исследований отобраны 5 фракций, номинальные размеры ячеек верхнего и нижнего контрольных сит представлены в табл. 1. В качестве базового параметра, характеризующего размер зерен фракции, принят средний номинальный размер ячеек верхнего W_{ui} и нижнего W_{li} сит: $W_{mi} = (W_{ui} + W_{li})/2$. В соответствии с ГОСТ Р 52381 $W_{ui}/W_{li} = 1,18...1,21$.

Изображения профиля зерен получали на оптическом стереоскопическом микроскопе

«Альтами» CM0870-Т. Обработку изображений зерен и вычисление геометрических параметров осуществляли с использованием программного обеспечения [24]. В каждой фракции измеряли 800 зёрен. Определяли и исследовали следующие геометрические параметры зёрен: длину l , ширину b и коэффициент формы (отношение l/b).

Результаты и их обсуждение

Исходя из фактической (наблюдаемой) закономерности распределения размеров зерен (рис. 1–3), для определения теоретического распределения выбраны четыре закона: нормальный, логнормальный, гамма-распределение и закон максимального значения. Нормальный закон применяется для моделирования распределений, имеющих симметричные правую и левую ветви графиков [25].

В табл. 2 жирным шрифтом выделены наблюдаемые и критические значения критериев Пирсона, удовлетворяющие условию $\chi^2_{obs} < \chi^2_{crit}$, что свидетельствует о принадлежности выборки к рассматриваемому закону распределения. Распределение длины зёрен в девяти фракциях из десяти подчиняется законам гамма-распределения (90 %) и максимального значения (90 %). Логнормальному закону в большей степени подчиняются распределения длин зерен роторного дробления (в четырех фракциях из пяти). Длина зерен пресс-валкового измельчения логнормальному закону не подчиняется.

Таблица 1

Table 1

Фракции шлифовальных порошков (ГОСТ Р 52381)

Grinding powder fractions (GOST R 52381)

Условное обозначение фракций / Fraction designation	Номинальный размер ячеек сит / Nominal size of sieve cells		
	Верхнее сито W_u , мкм / Upper sieve W_u , μm	Нижнее сито W_l , мкм / Lower sieve W_l , μm	Среднее значение $W_m = (W_u + W_l)/2$, мкм / Average value $W_{mi} = (W_u + W_l)/2$, μm
1	2360	2000	2180
2	1700	1400	1550
3	1000	850	925
4	600	500	550
5	300	250	275

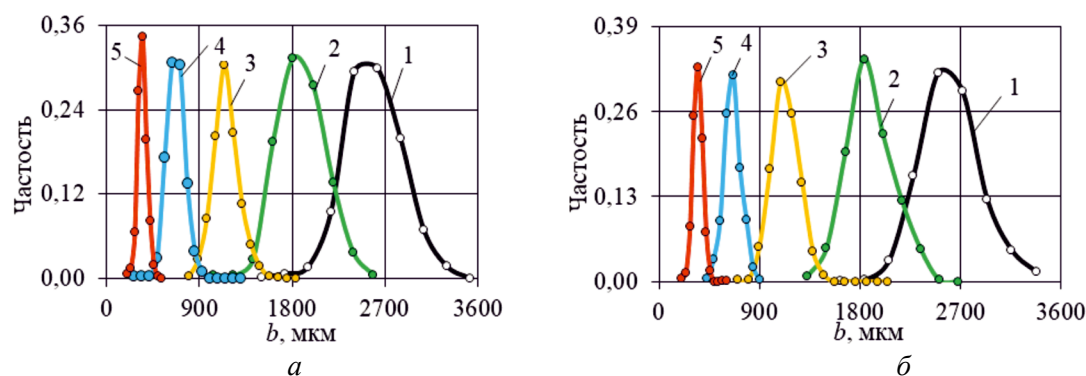


Рис. 1. Наблюдаемые распределения ширины b зерен фракций после пресс-валкового (a) и роторного ($б$) способов измельчений

Fig. 1. Experimental distributions of grain width b for fractions after roller-press (a) and rotary ($б$) grinding methods

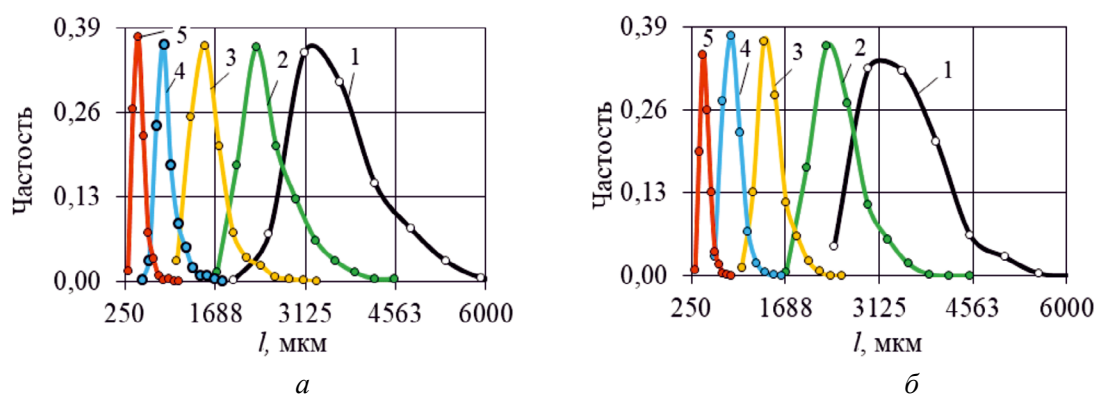


Рис. 2. Наблюдаемые распределения длины l зерен фракций после пресс-валкового (a) и роторного ($б$) способов измельчений

Fig. 2. Experimental distribution of grain length l for fractions after roller-press (a) and rotary ($б$) milling methods

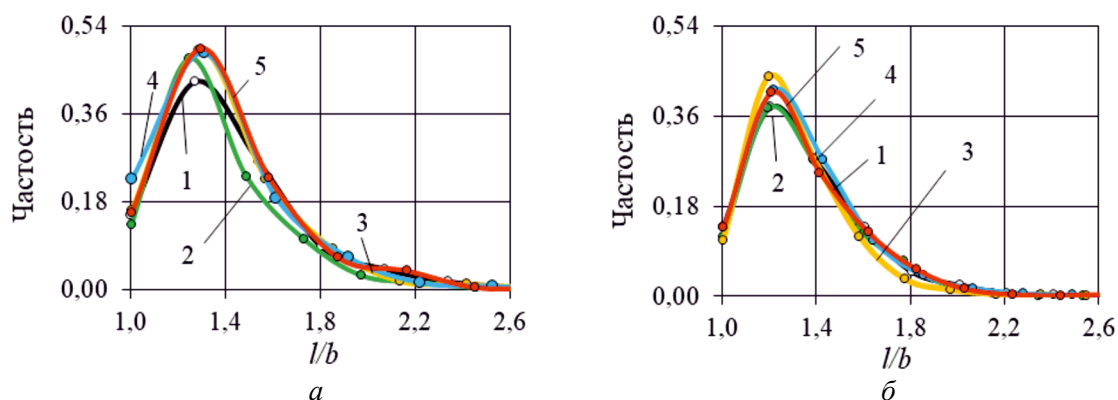


Рис. 3. Наблюдаемые распределения коэффициента формы l/b зерен фракций после пресс-валкового (a) и роторного ($б$) способов измельчений

Fig. 3. Experimental distribution of the aspect ratio l/b for fractions after roller-press (a) and rotary ($б$) milling methods

Ширина зерен всех рассмотренных фракций подчиняется нормальному закону распределения (табл. 3). Наблюдаемые значения критерия Пирсона во фракциях меньше критических. В

девяти фракциях из десяти коэффициент формы зерен подчиняется законам гамма-распределения и максимального значения (90 %). На основании полученных результатов приняты

Таблица 2

Table 2

Достоверность соответствия наблюдаемого распределения длины зерен теоретическому по критерию согласия Пирсона χ^2

Reliability of the correspondence of the observed grain length distribution to the theoretical one according to Pearson's chi-squared test χ^2

Измельчение / Grinding method	Фракция / Fraction	Логнормальный / Lognormal		Гамма-распределение / Gamma distribution		Максимальное значение / Length maximum value	
		χ^2_{obs}	χ^2_{crit}	χ^2_{obs}	χ^2_{crit}	χ^2_{obs}	χ^2_{crit}
Пресс-валковое / Roller-press	1	53,5	11,1	5,8	11,1	16,7	16,9
	2	37,4	11,1	5,5	9,5	1,7	11,1
	3	36,9	11,1	11,1	18,3	8,9	12,6
	4	54,7	11,1	8,0	18,3	9,3	11,1
	5	18,2	9,5	8,5	11,1	3,8	12,6
Роторное / Rotary	1	7,9	9,5	3,5	9,5	14,4	11,1
	2	7,4	9,5	11,1	9,5	9,3	11,1
	3	15,1	9,5	6,4	18,3	8,6	11,1
	4	6,2	9,5	8,2	9,5	11,8	14,1
	5	6,6	9,5	8,2	18,3	9,1	11,1
Достоверность, % / Reliability, %		40		90		90	

Таблица 3

Table 3

Достоверность соответствия наблюдаемых распределений ширины и коэффициента формы зерен по критерию Пирсона

Reliability of the correspondence of the observed distributions of grain width and shape factor according to Pearson's test

Способ / Method	Фракция / Fraction	Ширина / Width		Коэффициент формы / Shape coefficient			
		Нормальный / Normal		Логнормальный / Lognormal		Максимальное значение / Maximum value	
		χ^2_{obs}	χ^2_{crit}	χ^2_{obs}	χ^2_{crit}	χ^2_{obs}	χ^2_{crit}
Пресс-валковый / Roller-press	1	5,8	5,8	34,0	7,8	6,0	11,1
	2	5,5	5,5	68,9	11,1	7,6	7,8
	3	11,1	11,1	40,1	7,8	3,1	7,8
	4	8,0	8,0	54,6	11,1	9,4	11,1
	5	8,5	8,5	66,9	14,1	8,3	11,1
Роторный / Rotor	1	3,5	3,5	30,2	12,6	4,6	12,6
	2	11,1	11,1	52,4	12,6	11,3	12,6
	3	6,4	6,4	30,4	9,5	5,4	12,6
	4	8,2	8,2	29,9	9,5	4,3	9,5
	5	8,2	8,2	62,5	12,6	3,3	9,5
Достоверность, % / Reliability, %		100		0		100	

следующие законы распределения: ширина зёрен подчиняется нормальному закону распределения, а длина и коэффициент формы – закону максимального значения.

Одним из самых популярных в статистике критериев корреляции, характеризующим силу линейной связи между параметрами, считается критерий Пирсона. Условиями применения критерия являются одинаковый объем выборки и нормальный закон распределения анализируемых параметров. Учитывая, что ширина зерен подчиняется нормальному закону распределения, а длина и коэффициент формы – закону максимального значения, любые выбранные пары геометрических параметров зёрен не будут удовлетворять условию нормального закона распределения. В связи с этим оценку силы связи между параметрами осуществляли по ранговому критерию Спирмена [25]. Для этого натуральные значения геометрических параметров преобразовали в ранговые. Числовые геометрические параметры ранжировали в порядке возрастания и каждому последующему числовому значению присваивали порядковый номер (ранг).

Графическая интерпретация корреляционных связей между геометрическими параметрами зерен, полученных пресс-валковым и роторным измельчением, представлена на рис. 4. По оси абсцисс отложена полусумма номинальных размеров ячеек верхнего и нижнего сит фракций W_m (см. табл. 1). Для оценки силы связи коэффициентов корреляции использовали шкалу Чеддока.

Ранговый коэффициент корреляции ρ длины l и ширины b зерен не превышает 0,3. Среднее значение ρ между параметрами $b-l$ для пресс-валкового способа измельчения составляет 0,21, для роторного – 0,25. Значительно возрастает сила связи коэффициента формы зерен l/b с параметром длины l , среднее значение ρ более 0,7. Сила связи коэффициента изометричности l/b с шириной зерен для выбранных фракций изменяется в интервале от –0,35 до –0,50 и свидетельствует о том, что с увеличением ширины коэффициент формы зерен снижается.

В соответствии с абсолютными значениями коэффициентов корреляции сила связи между параметрами $b-l$ относится к категории «слабая», $b-l/b$ – к категории «умеренная». Значение коэффициентов ранговой корреляции между па-

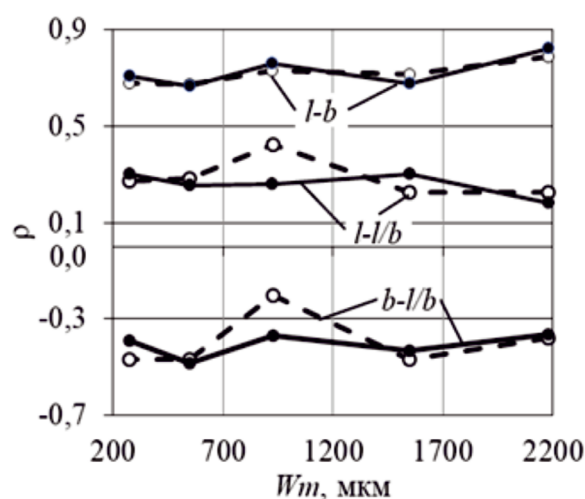


Рис. 4. Коэффициент корреляции Спирмена ρ между геометрическими параметрами зерен различных фракций:

● – пресс-валковое измельчение; ○ – роторное измельчение

Fig. 4. Spearman's rank correlation coefficient ρ between geometric parameters of grains in different fractions:

● – roller-press grinding; ○ – rotary grinding

аметрами $l-l/b$ располагается в нижней части категории «связь сильная». Диапазон изменения значений ρ – от 0,69 до 0,84, среднее значение 0,76. В соответствии с принятой градацией коэффициента ρ связь считаем сильной. Способ измельчения существенного влияния на силу связи не оказывает.

Возможность моделирования взаимосвязи между геометрическими параметрами стандартным набором функциональных зависимостей рассматривали в программе MS Excel. В табл. 4 приведены значения постоянных коэффициентов и коэффициентов достоверности аппроксимации R^2 взаимосвязи между геометрическими параметрами зерен следующими зависимостями:

$$l = a_1 b; \quad (1) \quad l/b = a_2 b + c_1; \quad (2)$$

$$l/b = a_3 l; \quad (3) \quad l/b = a_4 l + c_2. \quad (4)$$

Для зёрен, полученных пресс-валковым и роторным способами измельчения, достоверность аппроксимации зависимостью $l = a_1 b$ (1) не превышает 0,25 и свидетельствует о низком уровне связи. Низкая достоверность аппроксимации получена при моделировании зависимостью (2) коэффициента формы l/b от ширины зерна b . Значимое увеличение R^2 обеспечивает прямая

Таблица 4

Table 4

Постоянные коэффициенты и коэффициенты достоверности аппроксимации взаимосвязи между геометрическими параметрами зёрен

Constant coefficients and confidence coefficients for approximating the relationship between geometric parameters of grains

Пресс-валковое измельчение / Roller-press grinding										
Фракции / Fraction	$l = a_1 b$		$l/b = a_2 b + c$			$l/b = a_3 l$		$l/b = a_4 l + c_2$		
	a_1	R^2	a_2	c	R^2	a_3	R^2	a_4	c_2	R^2
1	1,39	0,10	−0,00044	2,54	0,16	0,00054	0,65	0,00037	0,065	0,72
2	1,34	0,10	−0,00046	2,25	0,17	0,00053	0,55	0,00044	0,247	0,57
3	1,37	0,10	−0,00079	2,30	0,13	0,00087	0,69	0,00078	0,141	0,70
4	1,35	0,20	−0,0017	2,49	0,22	0,0015	0,55	0,00135	0,145	0,56
5	1,37	0,15	−0,0029	2,41	0,19	0,0029	0,55	0,00255	0,176	0,54
$R^2 m$	—	0,13	—	—	0,17	—	0,58	—	—	0,63
Роторное измельчение / Rotary grinding										
Фракции / Fraction	$l = a_1 b$		$l/b = a_2 b + c$			$l/b = a_3 l$		$l/b = a_4 l + c_2$		
	a_1	R^2	a_2	c	R^2	a_3	R^2	a_4	c_2	R^2
1	1,33	0,15	−0,00037	2,31	0,17	0,00038	0,64	0,00035	0,138	0,64
2	1,32	0,21	−0,00051	2,30	0,21	0,00053	0,56	0,00046	0,188	0,57
3	1,29	0,13	−0,00075	2,16	0,20	0,00089	0,47	0,00070	0,277	0,51
4	1,32	0,25	−0,0015	2,32	0,24	0,0015	0,49	0,00129	0,219	0,51
5	1,31	0,21	−0,0029	2,31	0,24	0,0029	0,45	0,00238	0,243	0,48
$R^2 m$	—	0,19	—	—	0,21	—	0,52	—	—	0,54

пропорциональная зависимость (3). Средние значения коэффициента достоверности аппроксимации для зёрен, полученных пресс-валковым и роторным способами измельчения, соответственно равны 0,58 и 0,52. Замена пропорциональных связей на линейные (4) свидетельствует о некотором повышении достоверности аппроксимации.

В качестве примера на рис. 5 показаны графические зависимости регрессионных связей между геометрическими параметрами зёрен фракций 3, полученных пресс-валковым (рис. 5, а, б) и роторным (рис. 5, в, г) способами измельчений. Выборки данных, представленные на рис. 5, а, г, аппроксимировали прямой пропорциональной зависимостью ($l = a_1 b$), на рис. 5, б, в – линейной ($l/b = a_2 b + c$).

Необходимо отметить, что после пресс-валкового измельчения относительное количество зёрен, длина которых превышает, напри-

мер, 4650 мкм (см. рис. 5, а), значимо больше по сравнению с роторным (см. рис. 5, в), что отражается и на коэффициенте формы. Количество зёрен с коэффициентом формы $l/b > 2$ после пресс-валкового измельчения в 3,5 раза больше по сравнению с роторным (см. рис. 5, б, г). Подобные закономерности наблюдаются и в других фракциях.

Зависимость коэффициента формы от длины зерен в каждой из пяти фракций показана на рис. 6. В интервале значений l/b от 2 до 4 плотность распределения игольчатых зёрен, полученных способом пресс-валкового измельчения (рис. 6, а), значимо больше по сравнению с роторным (рис. 6, б). В крупных фракциях 1–3, полученных пресс-валковым способом измельчения (см. рис. 6, а), отсутствуют зерна, коэффициент формы которых более 3. При роторном измельчении таких зёрен нет во всех фракциях (см. рис. 6, б).

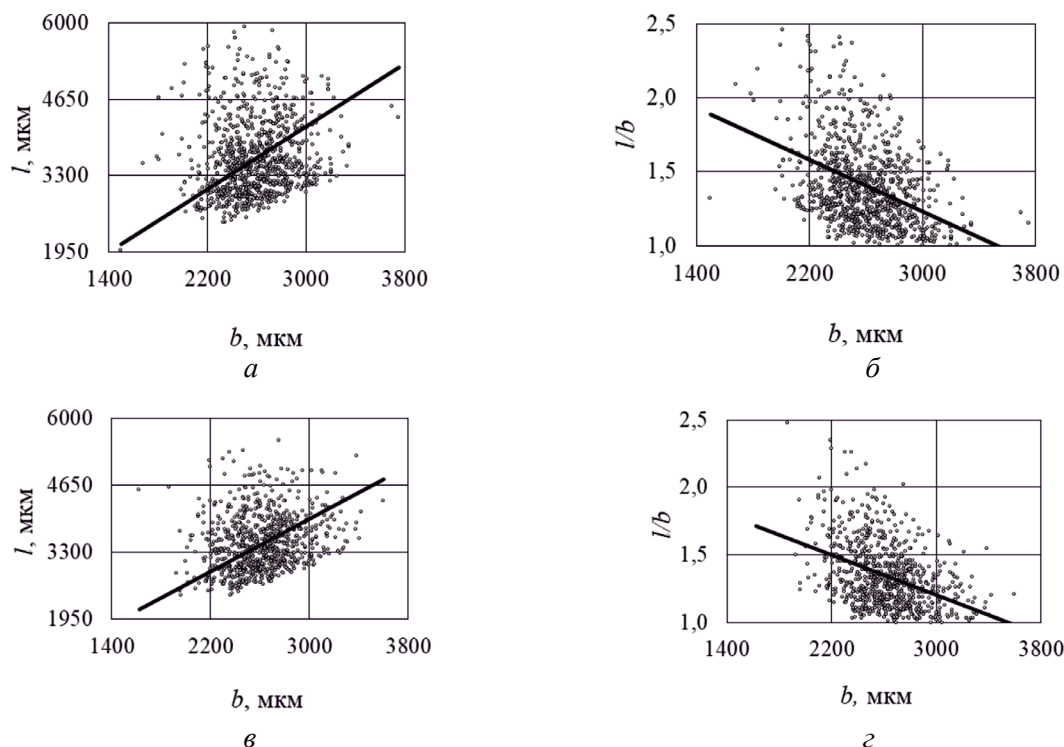


Рис. 5. Регрессионные связи между геометрическими параметрами зерен фракции 2:
 $a, б$ – пресс-валковое измельчение; $в, г$ – роторное измельчение

Fig. 5. Regression relationships between geometric parameters of grains in fraction 2:
 $a, б$ – roller-press grinding; $в, г$ – rotary grinding

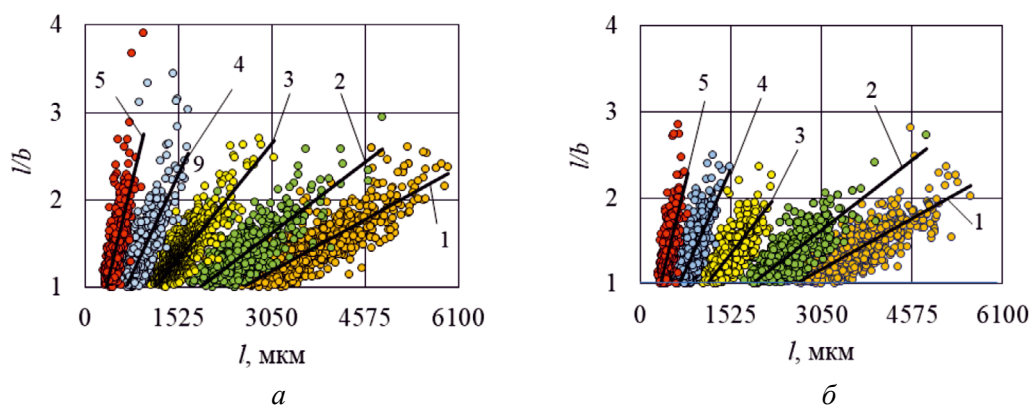


Рис. 6. Зависимость коэффициента формы l/b от ширины b зерен пяти фракций после пресс-валкового (a) и роторного ($б$) измельчения

Fig. 6. Dependence of the aspect ratio l/b on grain width b for five fractions after roller-press (a) and rotary ($б$) grinding

Дана количественная оценка содержания игольчатых и изометричных зёрен, полученных пресс-валковым и роторным способами измельчения (рис. 7). После пресс-валкового измельчения содержание игольчатых зёрен ($l/b > 2$) в пяти фракциях изменяется в интервале 2,8–5,2 %, после роторного – в интервале 0,9–1,9 %. Среднее количество игольчатых зёрен в выборках пяти фракций после роторного

измельчения по сравнению с пресс-валковым снижается в 3 раза.

Количество изометричных зёрен ($l/b \leq 1,3$) после пресс-валкового и роторного измельчения изменяется в интервале 33–46 % (рис. 7, б). Наибольшее количество изометричных зёрен (40–46 %) обеспечивает роторное измельчение. После пресс-валкового измельчения содержание изометричных зёрен изменяется в интервале от

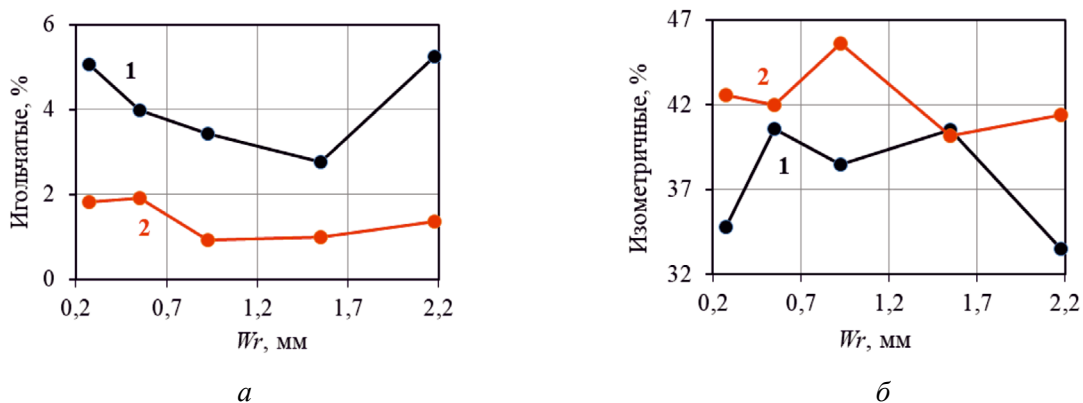


Рис. 7. Содержание игольчатых (а) и изометричных (б) зерен после пресс-валкового (1) и роторного (2) измельчения в зависимости от среднего размера ячеек верхнего и нижнего сит фракции Wm

Fig. 7. Content of needle-like (a) and isometric (b) grains after roller-press (1) and rotary (2) grinding, depending on the average cell size of the upper and lower sieves of the Wm fraction

33 до 41 %. Количество изометричных зёрен после роторного измельчения в среднем составляет около 42 %, а после пресс-валкового измельчения – 37 %, что на 5 % меньше.

Выводы

1. После пресс-валкового и роторного измельчений распределение коэффициента формы зёрен подчиняется закону максимального значения. Распределение геометрических параметров, на основании которых рассчитаны значения коэффициентов формы, подчиняются следующим законам распределения: длина зёрен – закону максимального значения; ширина зёрен – закону нормального распределения.

2. В связи тем, что из трех анализируемых геометрических параметров только распределение ширины зёрен подчиняется нормальному закону распределения, невыполнимо обязательное условие применения критерия Пирсона: анализируемые выборки геометрических параметров должны подчиняться закону нормального распределения. В связи с этим для оценки силы связи использовали ранговый критерий Спирмена.

3. Получены следующие значения коэффициента ранговой корреляции Спирмена ρ : между параметрами длины l и ширины b зёрен ρ не превышает 0,3, связь прямая, слабая; между параметрами ширины b и коэффициента формы l/b зёрен ρ изменяется в интервале от $-0,35$ до $-0,50$, связь обратная, средняя; между параметрами

длины l и коэффициента формы l/b зёрен ρ более 0,7, связь прямая, высокая.

4. На примере графических зависимостей между геометрическими параметрами зёрен фракций 2 показано, что количество зёрен, длина которых приближается к граничным размерам в интервале $l \geq 4650$ мкм, после пресс-валкового измельчения значительно больше по сравнению с роторным.

5. После роторного измельчения количество изометричных зёрен, по сравнению с пресс-валковым, возрастает в среднем на 5 %, в самой крупной фракции – на 8 %. Пресс-валковый способ измельчения отличается повышенным содержанием игольчатых зёрен. Среднее содержание игольчатых зёрен в пяти фракциях составляет около 4 %. После роторного измельчения количество игольчатых зёрен снижается в 3 раза. Содержание игольчатых зёрен возрастает от крупных фракций к мелким и от роторного измельчения к пресс-валковому.

Список литературы

1. Богуцкий В.Б., Шрон Л.Б. Изменение характеристик рабочей поверхности шлифовального круга за период его стойкости // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 66–74. – DOI: 10.14529/engin190206. – EDN EXAFOD.
2. Братан С.М., Харченко А.О., Часовитина А.С. Анализ и моделирование закономерностей изменения размеров профилей абразивных зёрен и пло-



щадок износа в процессе шлифования // Вестник современных технологий. – 2020. – № 1 (17). – С. 43–48. – EDN FIUUSO.

3. Characterization of grain geometrical features for monolayer brazed grinding wheels based on grain cross-sections / J. Chen, C. Cui, G. Huang, H. Huang, X. Xu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 105. – P. 1425–1436. – DOI: 10.1007/s00170-019-04354-1.

4. Современные представления о плавных и спеченных огнеупорных заполнителях / М. Шнабель, А. Бур, Д. Шмидтмайер, С. Чаттерджи, Д. Даттон // Новые огнеупоры. – 2016. – № 3. – С. 107–114. – DOI: 10.17073/1683-4518-2016-3-107-114.

5. Одарченко И.Б., Прусенко И.Н. Роль огнеупорного наполнителя в процессах структурообразования стержневых смесей // Литье и металлургия. – 2017. – № 4 (89). – С. 89–93. – EDN YMRXUZ.

6. Yoshihara N., Takahashi H., Mizuno M. Effect of the abrasive grain distribution on ground surface roughness // International Journal of Automation Technology. – 2022. – Vol. 16 (1). – P. 38–42. – DOI: 10.20965/ijat.2022.p0038.

7. Сазонов С.Е., Емченко Е.А., Стреляная Ю.О. Исследование повышения эффективности процесса шлифования кругами из классифицированного по форме абразивного зерна // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2020. – Т. 7, № 3–4. – С. 59–63. – EDN OCXGZG.

8. Шатко Д.Б., Люкшин В.С. Исследование режущей способности единичных абразивных зерен в зависимости от их формы и пространственной ориентации // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 5 (159). – С. 23–30. – DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-23-30. – EDN QIVLVI.

9. Korotkov A., Korotkov V. Grinding tools made of grains with controlled shape and orientation // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 224. – P. 01071. – DOI: 10.1051/mateconf/201822401071.

10. Гаришин А.П., Федотова С.М. Абразивные материалы и инструменты. Технология производства. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 1009 с. – ISBN 978-5-7422-1853-1. – EDN QNEQXH.

11. Tamás L., Rácz Á. Comparison of particle size and shape distribution of corundum produced by industrial ball mill and material bed compression // Multidisciplinária tudományok. – 2021. – Vol. 11. – P. 59–67. – DOI: 10.35925/j.multi.2021.5.6.

12. Li Z., Zhai H., Tan M. Particle shape characterization of brown corundum powders by SEM and image analysis // IET Conference Publications. – 2006. – P. 1310–1313. – DOI: 10.1049/cp:20060969.

13. Machine learning reveals the influences of grain morphology on grain crushing strength / Y. Wang, G. Ma, J. Mei, Y. Zou, D. Zhang, W. Zhou, X. Cao // Acta Geotechnica. – 2021. – Vol. 16. – P. 3617–3630. – DOI: 10.1007/s11440-021-01270-1.

14. Crushing mechanism analysis of sintered ore and study of particle size distribution pattern after crushing / P. Tang, B. Dai, Z. Zhou, W. Ma // Iron-making & Steelmaking: Processes, Products and Applications. – 2024. – Vol. 51. – P. 527–545. – DOI: 10.1177/03019233241248987.

15. Ajaka O., Akinbinu V. Design, fabrication and performance analysis of a planetary roll mill for fine grinding // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2011. – Vol. 6. – P. 75–90.

16. Comminution behavior and mineral liberation characteristics of low-grade hematite ore in high pressure grinding roll / J. Cao, L. Liu, Y. Han, A. Feng // Physicochemical Problems of Mineral Processing. – 2019. – Vol. 55. – P. 575–585. – DOI: 10.5277/ppmp18169.

17. Люкшин В.С., Шатко Д.Б. Совершенствование процесса сортировки абразивов по форме // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2022. – № 4 (152). – С. 13–22. – DOI: 10.26730/1999-4125-2022-4-13-22.

18. Shatko D.B., Lyukshin V.S., Strelnikov P.A. Separation of abrasive materials according to the form // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 927. – P. 35–42. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.927.35. – EDN YBJVML.

19. Вайсберг Л.А., Устинов И.Д. Феноменология вибрационной классификации и усреднения по крупности гранулярных материалов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 181–189. – DOI: 10.18721/JEST.25118. – EDN ZFDLBB.

20. Байдакова Н.В. О принципах управления технологической частью классификатора типа ВДК на операциях спецрассева абразивных материалов // Тяжелое машиностроение. – 2023. – № 4. – С. 29–32. – EDN CGFJRJ.

21. Патент № 2236303 С1 Российская Федерация, МПК В03С 7/08. Устройство для сепарации шлифовальных зерен по форме: № 2003113373/03: заявл. 06.05.2003; опубл. 20.09.2004 / А.Н. Коротков, С.А. Костенков, В.С. Люкшин, Н.В. Прокаев; заявитель ВолгГТУ. – EDN ZLNEOM.

22. ОАО «Волжский абразивный завод»: сайт. – URL: <https://vabz.ru/> (дата обращения: 21.08.2025).

23. Коротков А.Н., Дубов Г.М. Повышение эффективности отрезного шлифования // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2008. – № 4 (41). – С. 4–6. – EDN JVIEYN.

24. Программа для автоматизированного определения геометрических параметров шлифовально-го зерна по фотографии «Зерно НМ ВПИ»: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011610144 от 11.01.2011 / В.А. Носенко, А.А. Ры-

банов, И.А. Макушкин, А.А. Шегай, К.А. Букштано-вич; ВолгГТУ.

25. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – 12-е изд. – М.: Юрайт, 2012. – 478 с. – ISBN 978-5-9916-1589-1. – EDN QJYTKV.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



The effect of the grinding method on the grain shape coefficient of black silicon carbide

Vladimir Nosenko^{1, a, *}, Daniel Rivas Peres^{2, b}, Aleksey Aleksandrov^{1, c}, Aleksandr Sarazov^{1, d}

¹ Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, 43a Engelsa str., Volzhskiy, 404120, Russian Federation

² JSC “Volzhsky Abrasive Plant”, 169 F.G. Loginov Str., Volzhsky, 404119, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-5074-1099>,  vladim.nosenko2014@yandex.ru; ^b  <https://orcid.org/0009-0000-7733-236X>,  rivas-peres_de@vabz.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0003-1986-9139>,  alexalexal2011@yandex.ru; ^d  <https://orcid.org/0009-0007-3052-5691>,  sarazov_av@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21 April 2025

Revised: 05 May 2025

Accepted: 05 August 2025

Available online: 15 September 2025

Keywords:

Black silicon carbide

Fractions

Length

Width

Shape coefficient

Grinding methods

Correlation and regression analysis

Funding

The study was carried out with the financial support of JSC Volzhsky Abrasive Plant, Contract no. 4990/02/2024-13/48-24.

ABSTRACT

Introduction. JSC Volzhsky Abrasive Plant is the sole producer of silicon carbide in Russia and the largest producer in Europe. The company employs various methods, equipment, and technologies for grinding abrasive materials, which influence the geometric parameters of the grains. The most prominent and widely used methods for grinding silicon carbide in current production are roller-press grinding and rotary grinding. **The purpose of this work** is to study the effect of the roller-press and rotary methods of grinding black silicon carbide, which are used at the JSC Volzhsky Abrasive Plant, on the shape factor, length, and width of the grains in the sample fractions. **Research methods.** The initial material obtained in accordance with the current technological process was selected after crushing in a rod mill. One sample was crushed using the roller-press method, and the other was crushed using the rotary method. The crushed silicon carbide was sieved into fractions using a *Ro-Tap* sieve analyzer. The geometric parameters and grain shape were determined in five fractions, and 800 grains were measured in each fraction. The horizontal projection of the grain profile was obtained using an *Altami SM0870-T* optical stereoscopic microscope. Special software was used to process the projections and determine the geometric parameters. **Results and discussion.** It has been established that the shape factor and grain length follow the maximum value law, while the width follows the normal distribution law. The strength of the correlation between geometric parameters ranges from weak to strong, and the direction of the relationships varies from positive to negative. Graphical dependencies are presented, demonstrating the correlation and regression relationships between the geometric parameters of the grains in the fractions. Rotary grinding results in an average increase of 5% in the number of isometric grains compared to roller-press grinding, while the number of needle-like grains decreases by a factor of 3. The research findings are intended for optimizing the formulation and manufacturing technology of abrasive and refractory products.

For citation: Nosenko V.A., Rivas Perez D.E., Aleksandrov A.A., Sarazov A.V. The effect of the grinding method on the grain shape coefficient of black silicon carbide. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 3, pp. 108–121. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-108-121. (In Russian).

References

1. Bogutsky V.B., Shron L.B. Izmenenie kharakteristik rabochei poverkhnosti shlifoval'nogo kruga za period ego stoikosti [Change in the characteristics of the grinding wheel face during its redress life]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 66–74. DOI: 10.14529/engin190206.
2. Bratan S.M., Kharchenko A.O., Chasovitina A.S. Analiz i modelirovanie zakonomernostei izmeneniya razmerov profilei abrazivnykh zeren i ploshchadok iznosa v protsesse shlifovaniya [Analysis and modeling of patterns

* Corresponding author

Nosenko Vladimir A., D.Sc. (Engineering), Professor, Head of department
Volzhsky Polytechnic Institute
(branch) of Volgograd State Technical University,
43a Engelsa str.,
404120, Volzhskiy, Russian Federation
Tel.: +7 904 403-31-74, e-mail: vladim.nosenko2014@yandex.ru

of changes in the size of profiles of abrasive grains and platforms wear in the grinding process]. *Vestnik sovremennykh tekhnologii = Journal of Modern Technologies*, 2020, no. 1, pp 43–48.

3. Chen J., Cui C., Huang G., Huang H., Xu X. Characterization of grain geometrical features for monolayer brazed grinding wheels based on grain cross-sections. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 105, pp. 1425–1436. DOI: 10.1007/s00170-019-04354-1.

4. Schnabel M., Buhr A., Schmidtmeier D., Chatterjee S., Dutton J. Sovremennye predstavleniya o plavlenykh i spechennykh огнеупорных заполнителях [The modern concepts of the fused and sintered refractory aggregates]. *Novye огнеупоры = New Refractories*, 2016, no. 3, pp. 107–114. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-3-107-114.

5. Odarchenko I.B., Prusenko I.N. Rol' огнеупорного наполнителя в процессах структурообразования стержневых смесей [The role of refractory filler in the processes of structural formation of core mixtures]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, 2017, no. 4, pp. 89–93.

6. Yoshihara N., Takahashi H., Mizuno M. Effect of the abrasive grain distribution on ground surface roughness. *International Journal of Automation Technology*, 2022, vol. 16 (1), pp. 38–42. DOI: 10.20965/ijat.2022.p0038.

7. Sazonov S.E., Emchenko E.A., Strelyanaya Yu.O. Issledovanie povysheniya effektivnosti protsessa shlifovaniya krugami iz klassifitsirovannogo po forme abrazivnogo zerna [Study of increasing efficiency of the circular grinding process from classified by the form of abrasive grain]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii = Actual Problems in Machine Building*, 2020, vol. 7, no. 3–4, pp. 59–63.

8. Shatko D.B., Lyukshin V.S. Issledovanie rezhushchei sposobnosti edinichnykh abrazivnykh zeren v zavisimosti ot ikh formy i prostranstvennoi orientatsii [Investigation of cutting capacity of single abrasive grains depending on their shape and spatial orientation]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2023, no. 5, pp. 23–30. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-23-30.

9. Korotkov A., Korotkov V. Grinding tools made of grains with controlled shape and orientation. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 224, p. 01071. DOI: 10.1051/mateconf/201822401071.

10. Garshin A.P., Fedotova S.M. *Abrazivnye materialy i instrumenty. Tekhnologiya proizvodstva* [Abrasive materials and tools. Manufacturing technology]. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2008. 1009 p. ISBN 978-5-7422-1853-1.

11. Tamás L., Rácz Á. Comparison of particle size and shape distribution of corundum produced by industrial ball mill and material bed compression. *Multidiszciplináris tudományok*, 2021, vol. 11, pp. 59–67. DOI: 10.35925/j.multi.2021.5.6.

12. Li Z., Zhai H., Tan M. Particle shape characterization of brown corundum powders by SEM and image analysis. *IET Conference Publications*, 2006, pp. 1310–1313. DOI: 10.1049/cp:20060969.

13. Wang Y., Mei J., Zou Y., Zhang D., Cao X. Machine learning reveals the influences of grain morphology on grain crushing strength. *Acta Geotechnica*, 2021, vol. 16, pp. 3617–3630. DOI: 10.1007/s11440-021-01270-1.

14. Tang P., Dai B., Zhou Z., Ma W. Crushing mechanism analysis of sintered ore and study of particle size distribution pattern after crushing. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*, 2024, vol. 51, pp. 527–545. DOI: 10.1177/03019233241248987.

15. Ajaka O., Akinbinu V. Design, fabrication and performance analysis of a planetary roll mill for fine grinding. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2011, vol. 6, pp. 75–90.

16. Cao J., Liu L., Han Y., Feng A. Comminution behavior and mineral liberation characteristics of low-grade hematite ore in high pressure grinding roll. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2019, vol. 55, pp. 575–585. DOI: 10.5277/ppmp18169.

17. Lyukshin V.S., Shatko D.B. Sovershenstvovanie protsessa sortirovki abrazivov po forme [Improving the process of sorting abrasives by shape]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2022, no. 4 (152), pp. 13–22. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-4-13-22.

18. Shatko D.B., Lyukshin V.S., Strelnikov P.A. Separation of abrasive materials according to the form. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 927, pp. 35–42. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.927.35.

19. Vaisberg L.A., Ustinov I.D. Fenomenologiya vibratsionnoi klassifikatsii i usredneniya po krupnosti granulyarnykh materialov [Phenomenology for vibration-induced size segregation and mixing of granular materials]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki = St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 181–189. DOI: 10.18721/JEST.25118.

20. Baidakova N.V. O printsipakh upravleniya tekhnologicheskoi chast'yu klassifikatora tipa VDK na operatsiyakh spetsrasseva abrazivnykh materialov [Principles of the engineering management of the classifier



of TAC type on operations of the special sieving of abrasive materials]. *Tyazheloe mashinostroenie = Heavy Mechanical Engineering*, 2023, no. 4, pp. 29–32.

21. Korotkov A.N., Kostenkov S.A., Lyukshin V.S., Prokaev N.V. *Ustroistvo dlya separatsii shlifoval'nykh zeren po forme* [Device for separation of abrasive grains by shape]. Patent RF, no. 2236303, 2004.

22. OAO «Volzhskii abrazivnyi zavod» [OJSC “Volzhsky Abrasive Works”]. Website. Available at: <https://vabz.ru/> (accessed 21.08.2025).

23. Korotkov A.N., Dubov G.M. Povyshenie effektivnosti otreznogo shlifovaniya [Increase in cutoff grinding efficiency]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2008, no. 4 (41), pp. 4–6.

24. Nosenko V.A., Rybanov A.A., Makushkin I.A., Shegai A.A., Bukshtanovich K.A. *Programma dlya avtomatizirovannogo opredeleniya geometricheskikh parametrov shlifoval'nogo zerna po fotografii «Zerno NM VPI»* [Program for automated determination of geometric parameters of abrasive grain by photograph ‘Zerno NM VPI’]. The Certificate on official registration of the computer program, no. 2011610144, 2011.

25. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. 12th ed. Moscow, Yurait Publ., 2012. 478 p. ISBN 978-5-9916-1589-1.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).