

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

Научная статья

УДК 621.922.3

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-25-38

Коротков Виталий Александрович

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

\* для корреспонденции: arinasemykina@gmail.com

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ С УПОРЯДОЧЕННОЙ ФОРМОЙ ЗЕРЕН И ВЫСОКОПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ



### Информация о статье

Поступила:

12 февраля 2025 г.

Одобрена после  
рецензирования:

01 марта 2025 г.

Принята к печати:

10 марта 2025 г.

Опубликована:

24 марта 2025 г.

### Ключевые слова:

Шлифование, форма абразивных зерен, коэффициент формы зерен, передние углы зерен, высокопористые шлифовальные круги, стеклянные микросферы, коэффициент шлифования, режущая способность, составляющие силы резания, шероховатость

### Аннотация.

Проведены исследования в области создания и применения шлифовальных кругов с упорядоченной формой абразивных зерен и высокопористой структурой. Изготовлены и испытаны на операции плоского шлифования опытные круги из зерен марки 24A10H (F120) с контролируемой формой. Круги изготавливались из зерен изометрических, осколочных и игольчато-пластинчатых разновидностей, с порами из стеклянных микросфер марки МС-В. При испытаниях кругами велась обработка заготовок из стали ШХ15 в состоянии поставки и заготовок из закаленной стали Р6М5. Для изготовления опытных кругов исходный абразив 24A10H разделялся по форме на вибрационном сепараторе на фракции, форма зерен в которых была одинаковой, но дискретно изменялась от фракции к фракции. Для каждой фракции определены коэффициенты формы зерен и изучена взаимосвязь передних углов зерен во фракциях с их формой, а также взаимосвязь геометрических показателей зерен и эксплуатационных параметров шлифовальных кругов. В результате испытаний опытных инструментов установлено, что чем более вытянутую игольчато-пластинчатую форму имеют зерна, т. е. чем больше коэффициенты их формы, тем меньше их передние углы и составляющие силы резания, меньше деформации обрабатываемого материала и температура при шлифовании. Установлено также, что наиболее результативным в кругах для плоского шлифования является изготовление их из зерен изометрической формы. Это позволяет снизить износ кругов на 9-29% по сравнению со стандартным инструментом из исходного абразива, повысить их режущую способность на 21-28% и снизить шероховатость обрабатываемых поверхностей по параметру Ra на 22-25% в зависимости от обрабатываемого материала.

**Для цитирования:** Коротков В.А. Повышение эффективности шлифования на основе применения шлифовальных кругов с упорядоченной формой зерен и высокопористой структурой // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 1 (177). С. 25-38. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-25-38, EDN: FKGREN

### Введение

Шлифовальные инструменты состоят из зерен, связки и пор, где главную роль в процессе шлифо-

вания играют зерна, которыми срезаются обрабатываемый материал [1, 2, 3].

Установлено, что на эффективность процесса шлифования весьма существенно влияет форма

зерен [4, 5, 6, 7]. Форма зерен, получаемых путем дробления абразивных слитков, может варьироваться от изометрических (близких по форме к сфере) до осколочных и игольчато-пластинчатых разновидностей [7, 8]. Поскольку зерна являются своего рода микрорезцами, то от их формы и расположения в теле инструмента зависит их геометрия при резании (см. Рис. 1.)

отношению диаметров описанных и вписанных в проекцию зерен окружностей [7, 8] или диаметров описанных и вписанных сфер на 3D моделях зерен [9].

Разделение зерен по форме может осуществляться различными методами – вибросепарацией, сепарацией в воздушном потоке и потоке жидкости (методы флотации), путем использования электро-

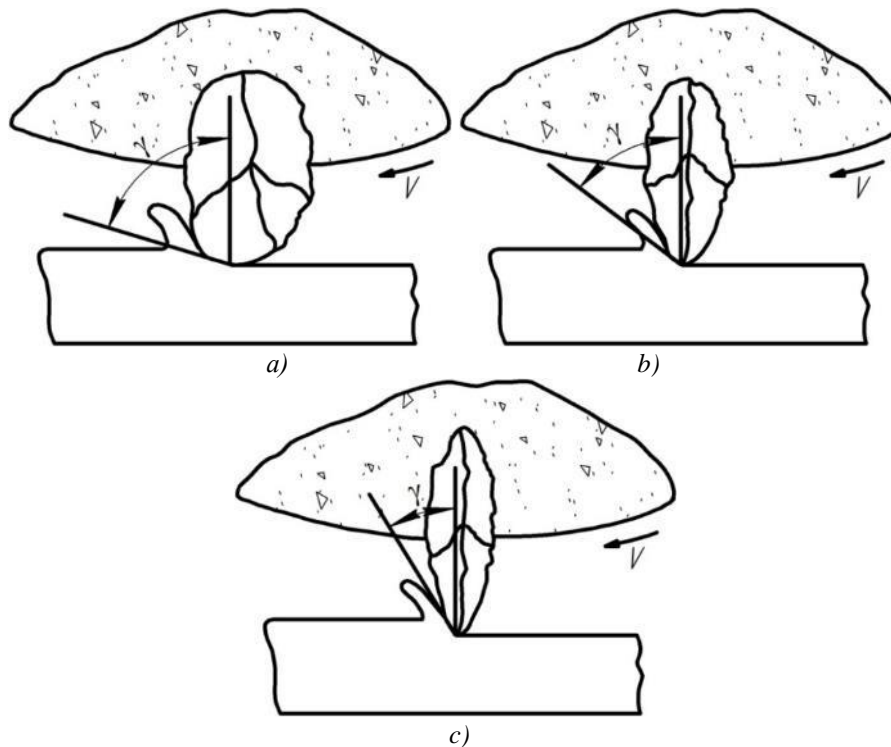


Рис. 1. Передние углы у зерен разной формы: (а) изометрических; (б) осколочных; (с) игольчато-пластинчатых

Fig. 1. Front angles of grains of different forms: (a) isometric; (b) fragmentary; (c) needle-plate

Зерна изометрической формы обладают более высокой прочностью и стойкостью, но имеют максимально отрицательные передние углы. Такие зерна сильно деформируют и нагревают металл при шлифовании. Зерна вытянутых форм имеют меньшую прочность, но обладают более благоприятной для резания геометрией, снимают металл с меньшими деформациями и температурами, формируя при этом более шероховатую обрабатываемую поверхность [7, 8, 9].

Все это влияет на эксплуатационные свойства готовых инструментов, поэтому форму зерен целесообразно подбирать опытно-исследовательским путем для конкретных условий обработки. Например, для алмазных кругов и паст используются алмазные зерна, полностью прошедшие сепарацию по форме. Для алмазных порошков по ГОСТ 9206-80 предусматривается содержание зерен изометрических форм во фракции более 90%.

Для более точной идентификации формы зерен важно иметь не только ее качественную оценку, но и количественную. С этой целью, например, форма алмазных зерен оценивается через коэффициент формы, равный отношению длины к ширине зерна [10, 11]. Для большинства обычных абразивов может быть использован другой коэффициент, равный

статического эффекта. Есть также принципиально другой метод, основанный на непосредственном изготовлении зерен с заданной формой. Это относится к зернам под названием сферокорунды и формокорунды [12].

В данной работе поставлена цель исследовать опытным путем влияние формы зерен белого электрокорунда марки 24A10Н (с размером основной фракции зерен 100 мкм) на эффективность чистового плоского шлифования деталей из различных марок сталей. Для изготовления опытных шлифовальных кругов в качестве порообразующего компонента использовались стеклянные микросферы, которые показали наилучшую эффективность среди других материалов при изготовлении кругов на керамической связке [12].

#### Методика исследований

На первоначальном этапе проведено разделение зерен по форме на специальном вибрационном сепараторе (Рис. 2), разработанном и запатентованном на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты КузГТУ», патент РФ № 2248851 [13].

Сепарация здесь осуществлялась путем поступления абразива из питателя на вибрирующую деку, которая настраивалась на определенные углы наклона в продольном и поперечном направлениях.



Рис. 2. Внешний вид вибрационного сепаратора, патент РФ № 2248851

Fig. 2. Vibrating separator, Russian Federation patent No. 2248851

Под воздействием колебаний, создаваемых вибро-возбудителем, а также в результате действия сил тяжести и трения происходит перемещение абразивных зерен по плоскости деки по определенным траекториям. По самым коротким траекториям движутся изометрические зерна, а по самым длинным – пластинчатые зерна. По краям деки расположены ячейки (емкости), которые собирают движущиеся зерна одинаковой формы.

Для каждой зернистости абразива перед процедурой сепарации опытным путем подбирались оптимальные углы наклона деки, амплитуда и частота колебаний вибровозбудителя. Так, для сепарации зерен 24A10H (F120) поперечный угол наклона деки составлял  $6^\circ$ , а продольный –  $8,5^\circ$ . Для изготовления опытных кругов использовались абразивные зерна из 3, 8 и 10 ячеек сепаратора, т. е. изометрические, осколочные и мечевидные зерна [13].

Количественно форма зерен во фракциях оценивалась (как упоминалось ранее) через коэффициент формы, равный отношению диаметров описанных и вписанных окружностей на плоских проек-



Рис. 3. Стереомикроскоп модели «ЛОМО МЕТАМ Р-1» с закрепленным на нем цифровым фотоаппаратом для получения изображений зерен  
Fig. 3. Stereo microscope model «LOMO METAM R-1» with a digital camera attached to it for obtaining images of grains

циях зерен. Средний коэффициент формы для каждой фракции определяли по 50 произвольно выбранным зернам. Изображение зерен получали фотографированием при восьмидесятикратном увеличении на стереомикроскопе модели «ЛОМО МЕТАМ Р1» (Рис. 3, Рис. 4).

Для изготовления опытных кругов использовались: фракция изометрических зерен из 3-й ячейки сепаратора с  $K_f=1,51$ , фракция осколочных зерен из 8-й ячейки сепаратора с  $K_f=1,81$  и фракция игольчато-пластинчатых зерен из 10-й ячейки сепаратора с  $K_f=2,43$ . Коэффициент формы зерен в 8-й ячейке сепаратора практически совпадал со сред-

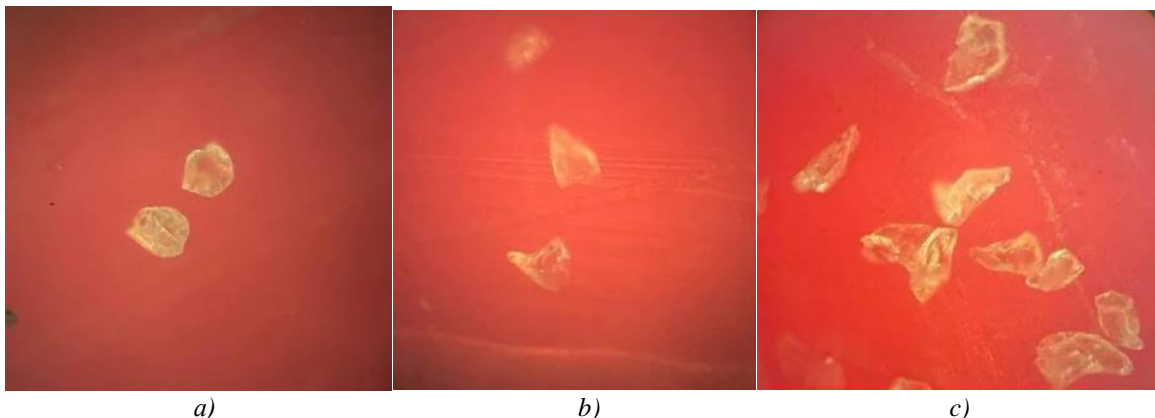


Рис. 4. Разновидности форм шлифовальных зерен марки 24A10H при 80-кратном увеличении на микроскопе «ЛОМО МЕТАМ Р-1»: (a) изометрическая, (b) осколочная, (c) игольчато-пластинчатая  
Fig. 4. Varieties of forms of grinding grains of grade 24A F120 at 80-fold magnification on a «LOMO METAM R-1» microscope: (a) isometric, (b) fragmentary, (c) needle-plate

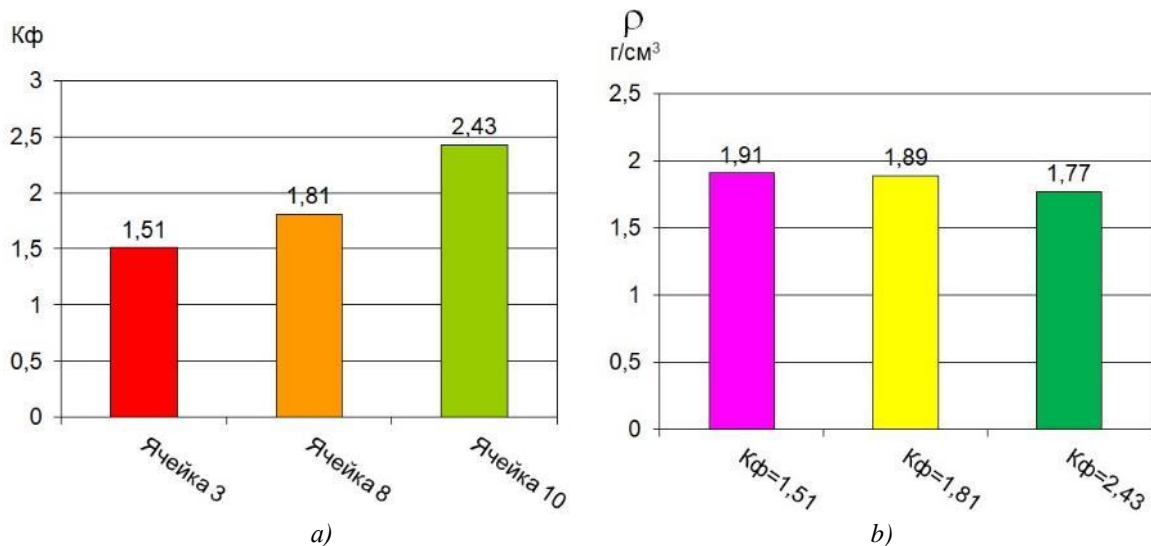


Рис. 5. Средние коэффициенты формы зерен марки 24A10H в различных ячейках сепаратора (a) и их насыпные плотности (b)

Fig. 5. Average form coefficients of 24A F120 grade grains in different separator cells (a) and their bulk densities (b)

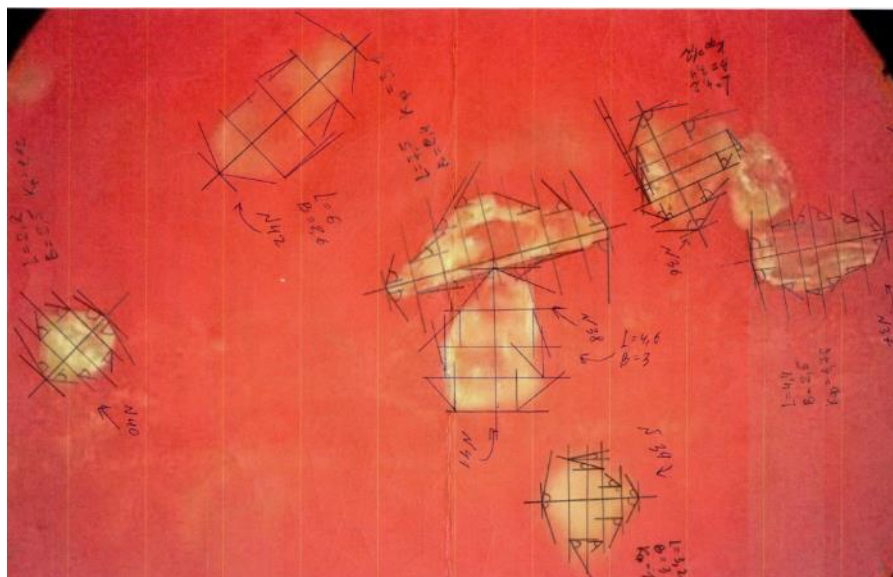


Рис. 6. Методика определения передних углов абразивных зерен  
Fig. 6. Methodology for research of the front angles of abrasive grains

ним  $K_f$  исходной фракции абразива, подвергнутой сепарации. Попутно также было установлено, что с увеличением коэффициента формы зерен уменьшается (на 3-5%) насыпная плотность абразива во фракциях (Рис. 5).

Далее были исследованы передние углы зерен во фракциях и установлена их взаимосвязь с коэффициентами формы. При исследованиях моделировалось радиальное расположение зерен при работе, т. е. наибольшие оси зерен располагались перпендикулярно плоскости резания. Изображения зерен распечатывались, проводились наибольшие оси зерен, перпендикулярно им прочерчивались гипотетические плоскости резания, проводились перпендикуляры к ним, касательные к передней поверхности зерен и измерялись передние углы.

Для каждого зерна измерялся коэффициент формы и в зависимости от конкретной конфигура-

ции получались от 10 до 18 значений передних углов (Рис. 6).

В результате построен график и математическая зависимость (1), показывающие, что с повышением коэффициента формы зерен их передние углы становятся более острыми и менее отрицательными (Рис. 7). В частности, они изменяются в диапазоне от  $-52^\circ$  у изометрических зерен ( $K_f=1,05$ ) до  $-25^\circ$  у игольчато-пластинчатых ( $K_f=3,1$ ).

Для других фракций абразива, из которых изготавливались опытные круги, передние углы составили соответственно: у изометрических зерен из 3-й ячейки сепаратора  $-43^\circ$ , у осколочных из 8-й ячейки  $-38^\circ$ , у игольчато-пластинчатых зерен из 10-й ячейки сепаратора  $-31^\circ$  (Рис. 8).

Математическая интерпретация зависимости передних углов от формы зерен может быть представлена уравнением (1):

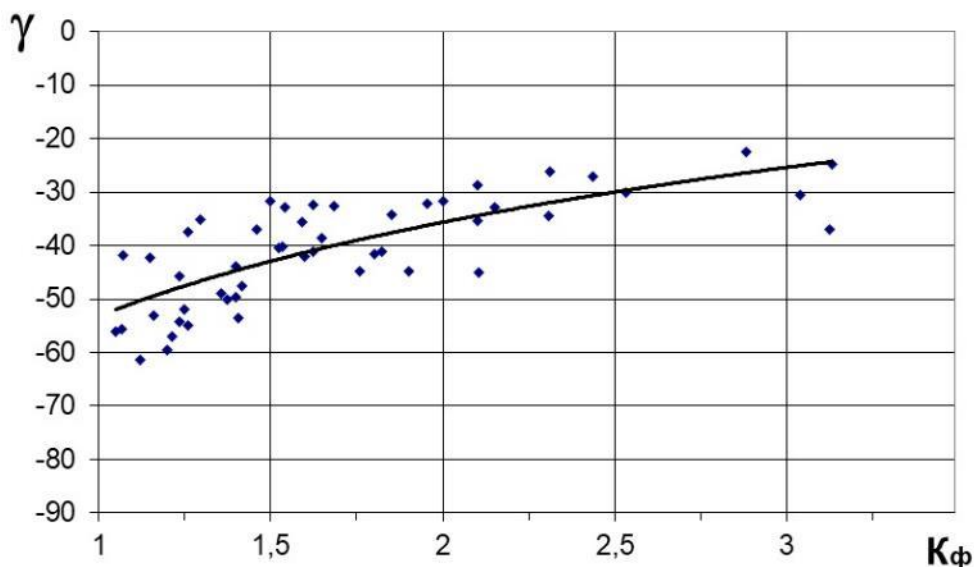


Рис. 7. Результаты исследования передних углов зерен марки 24A10H в зависимости от их коэффициента формы

Fig. 7. Results of research of the front angles of 24A F120 abrasive grains depending on their form coefficient

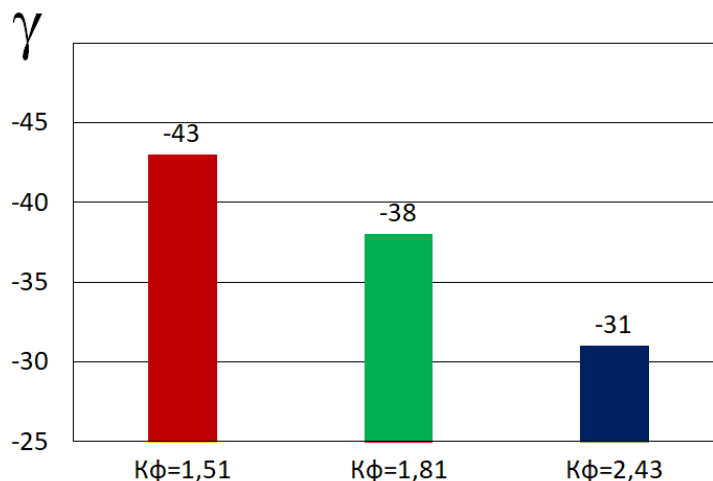


Рис. 8. Средние передние углы зерен фракций абразива 24A10H с различными коэффициентами формы из различных ячеек сепаратора

Fig. 8. Average front angles of grains of abrasive fractions 24A F120 with different form coefficients from different separator cells

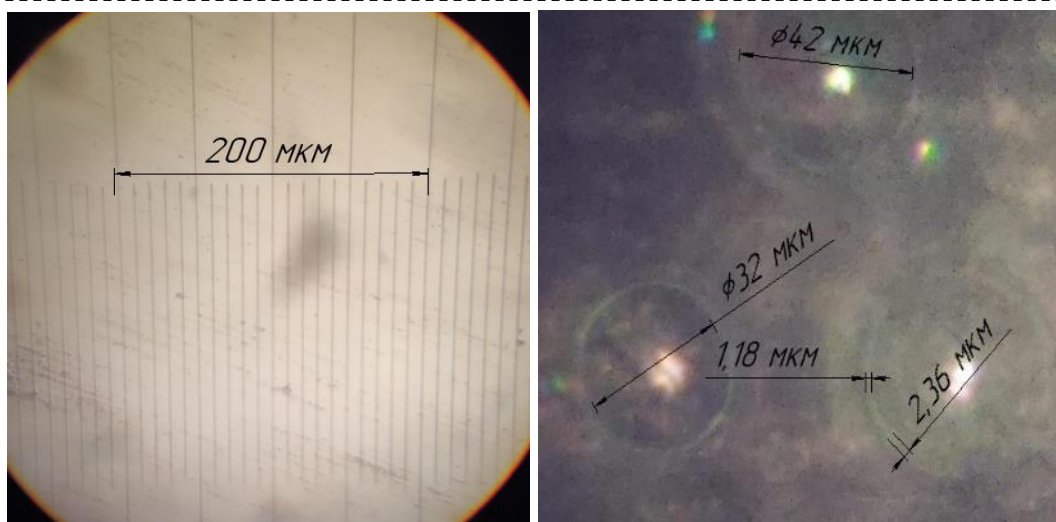
$$\gamma = -53,181 + 25,298 \cdot \ln(K_{\phi}); \quad R^2 = 0,58 \quad (1)$$

Работоспособность шлифовальных кругов, помимо упорядочения формы зерен, может быть также улучшена за счет применения высокопористой рецептуры, например путем добавления в нее стеклянных микросфер. Известно, что стеклянные микросферы с высокой эффективностью применяются в кругах на керамических связках Волжского абразивного завода [12]. В данной работе для создания высокопористой структуры в опытных кругах были использованы стеклянные микросферы марки МС-В (Рис. 9).

В результате анализа изображений микросфер, полученных при увеличении  $\times 400$  в графическом редакторе «Paint», установлено, что наружный диаметр стеклянных микросфер марки МС-В составляет в среднем 37 мкм, а толщина их стенок – 1,8 мкм. Таким образом, оказалось, что наружный размер стеклянных микросфер соответствовал аб-

разиву № 4 (F240), а размер сечений его стенок был меньше, чем у микропорошка марки МЗ и близок к размеру алмазных зерен в наиболее тонких алмазных пастах (1-2 мкм). Следовательно, от применения стеклянных микросфер в шлифовальных кругах следует ожидать не только создания высокопористой структуры, но и некоторого снижения шероховатости обрабатываемых поверхностей за счет абразивного воздействия стенок сфер на обрабатываемый материал.

В данной работе изготавливались опытные круги из зерен с контролируемой формой и одновременно с высокопористой структурой со стеклянными микросферами. В качестве связующего в опытных кругах применялась самотвердеющая эпоксидная смола ЭДП-2, позволяющая оперативно изготовить шлифовальный инструмент и близкая по свойствам к бакелитовой связке [14]. Объемные доли компонентов при приготовлении опытных



a)

b)

Рис. 9. Стекланные микросферы марки MS-B при увеличении  $\times 400$  на стереомикроскопе «ЛОМО-МЕТАМ Р-1», где: (a) – объект-микрометр; (b) – стекланные микросферы

Fig. 9. Glass microspheres of the MS-B brand at a magnification of  $\times 400$  on a «ЛОМО-МЕТАМ R-1» stereomicroscope, where: (a) – micrometer object; (b) – glass microspheres



a)

b)

c)

Рис. 10. Изготовление опытных кругов: (a) – укладка компонентов в прессформу; (b) – ручная подпрессовка на вертикально-фрезерном станке; (c) – правка круга алмазным карандашом по периферии

Fig. 10. Manufacturing of experimental wheels: (a) – placing the components into the mold; (b) – manual pressing on a vertical milling machine; (c) – turning the grinding wheel with a diamond pencil along the periphery

инструментов составляли: абразив – 36,9%, смола – 27,7%, криолит – 2,8%, пирит – 7,98%, стекланные микросферы – 24,6% (суммарная доля наполнителей составляла 35,4%). Эта рецептура обеспечивает получение высокопористых инструментов на полимерных связующих твердостью F (ВМ1) и структурой № 16-17. Размеры опытных кругов составляли 160x8x32 мм и при изготовлении они армировались 2-мя стеклосетками типа «СПАП» по торцам.

Процесс изготовления опытных кругов включал следующие основные этапы:

- подготовку прессформы (сборку и смазку парафином);
- вырезку стеклосеток;
- смешивание эпоксидной смолы с отвердителем (в соотношении 10:1);
- смешивание абразива со смолой;
- смешивание абразива, увлажненного смолой, с микросферами, криолитом и пиритом;

- укладку стеклосеток и абразивной смеси в форму и разравнивание;
- отверждение в естественных условиях (24 часа);
- выпрессовку из формы;
- правку готового инструмента по периферии, – точение алмазным карандашом на токарном станке (Рис. 10).

Готовые круги подвергались прочностным испытаниям на стенде с бронекamerой и бесступенчатым регулированием скорости вращения шпинделя, созданным на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» КузГТУ на базе станка 3А64Д (Рис. 11). В процессе проведения испытаний опытные круги разгонялись до скорости 35 м/с, что превышало их рабочую скорость, при которой они в дальнейшем эксплуатировались, в 1,5 раза (как требуют нормативы).

Для оценки работоспособности опытных шлифовальных кругов на операции плоского шлифова-



Рис. 11. Стенд для испытаний шлифовальных кругов на механическую прочность  
 Fig. 11. Test stand for grinding wheels for mechanical strength

ния использовался станок модели 3Г71 с установленным на него двухкомпонентным динамометром (Рис. 12).

При проведении испытаний в качестве заготовок использовались пластины из стали ШХ15 в состоянии поставки (НВ 180) с размерами 100x20x5 мм и из закаленной стали марки Р6М5 (HRC 63).

Такой выбор материалов заготовок обусловлен необходимостью оценить работоспособность опытных кругов при чистовом шлифовании сталей из разных групп с разной твердостью.

При проведении испытаний оценивались:

- коэффициент шлифования кругов как отношение массы сошлифованного материала к массе износа инструмента;
- режущая способность кругов как масса металла, снимаемого за один цикл обработки заготовки;
- величины радиальной ( $P_r$ ) и тангенциальной ( $P_z$ ) составляющих силы резания, а также их соотношение ( $P_r/P_z$ );
- температура нагрева заготовок при шлифовании;
- шероховатость обработанных поверхностей по параметрам  $R_a$  и  $R_z$ .

Один цикл обработки заготовки состоял в восьмикратном шлифовании ее поверхности при глубине резания 0,01 мм с последующим восьмикратным выхаживанием. Поперечная подача составляла 0,6 мм/ход, продольная подача – 8,5 мм/мин.

Составляющая силы резания  $P_r$  контролировалась при помощи электронных весов, закрепленных на столе станка вместе с обрабатываемыми заготовками. Составляющая силы резания  $P_z$  контролировалась косвенно с помощью ваттметра, встроенного в цепь электродвигателя привода шпинделя станка. Для контроля массы износа кругов и массы сошлифованного металла использовались лабораторные весы с пределом измерения 500 г. и ценой деления 0,01 г. Для контроля температуры заготовок применялся оптический пирометр с пределом измерения 950 °С и ценой деления 0,1 °С. Шерохо-



Рис. 12. Плоскошлифовальный станок модели 3Г71 с двухкомпонентным динамометром для испытания опытных кругов  
 Fig. 12. Surface grinding machine model 3G71 with a two-component dynamometer for testing experimental grinding wheels

ватость обработанных поверхностей исследовалась на цифровом профилографе-профилометре модели «TR200» (Рис. 13). Каждая заготовка измерялась четыре раза на различных участках, после чего полученные результаты усреднялись. Направление

измерения микронеровностей алмазной иглой было выбрано перпендикулярно направлению продольной подачи шлифовальных кругов [15, 16].

### Результаты и обсуждение

Результаты оценки коэффициентов шлифова-



Рис. 13. Профилограф-профилометр модели «TR200»  
Fig. 13. Profilograph-profilometer model «TR200»

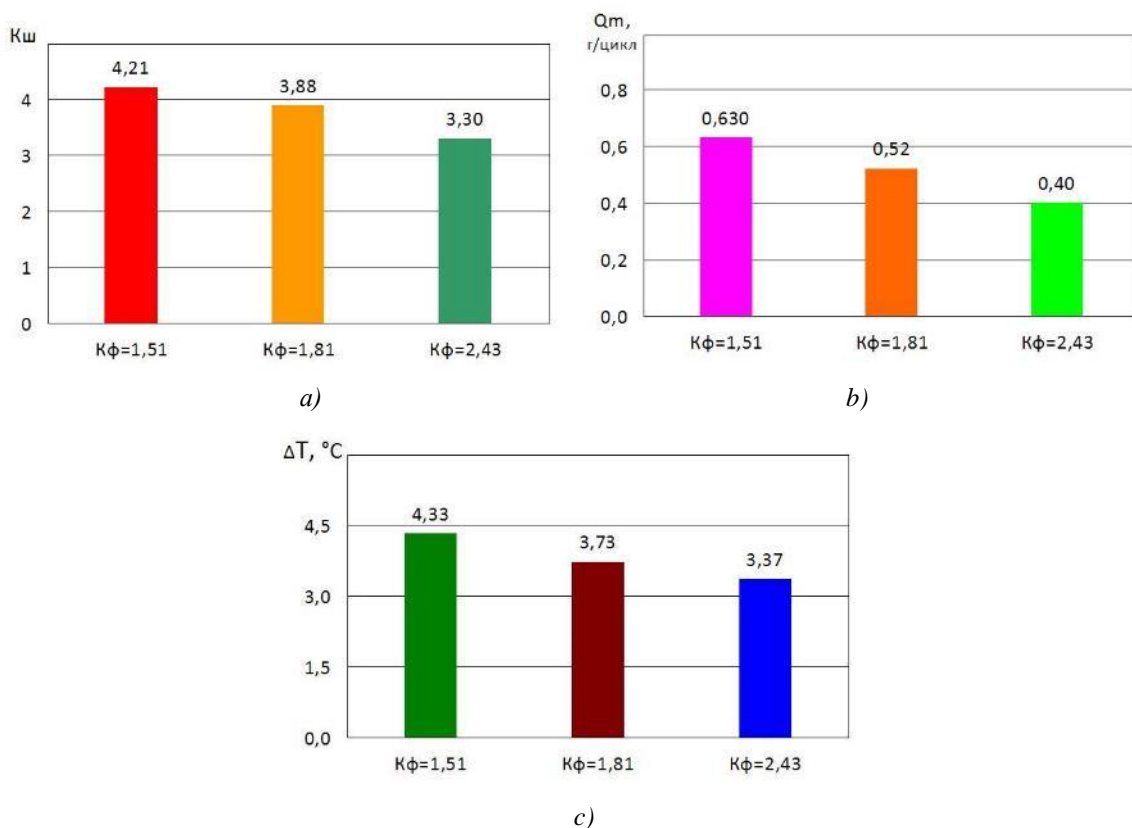


Рис. 14. Эксплуатационные показатели опытных кругов из зерен разной формы при плоском шлифовании заготовок из стали ШХ15 (HB 180), где: (a) – коэффициент шлифования; (b) – режущая способность кругов; (c) – температура нагрева заготовок

Fig. 14. Exploitation abilities of experimental grinding wheels made of grains of different forms during flat grinding of workpieces made of 52100 steel (HB 180), where: (a) – grinding coefficient; (b) – cutting ability of wheels; (c) – heating temperature of workpieces



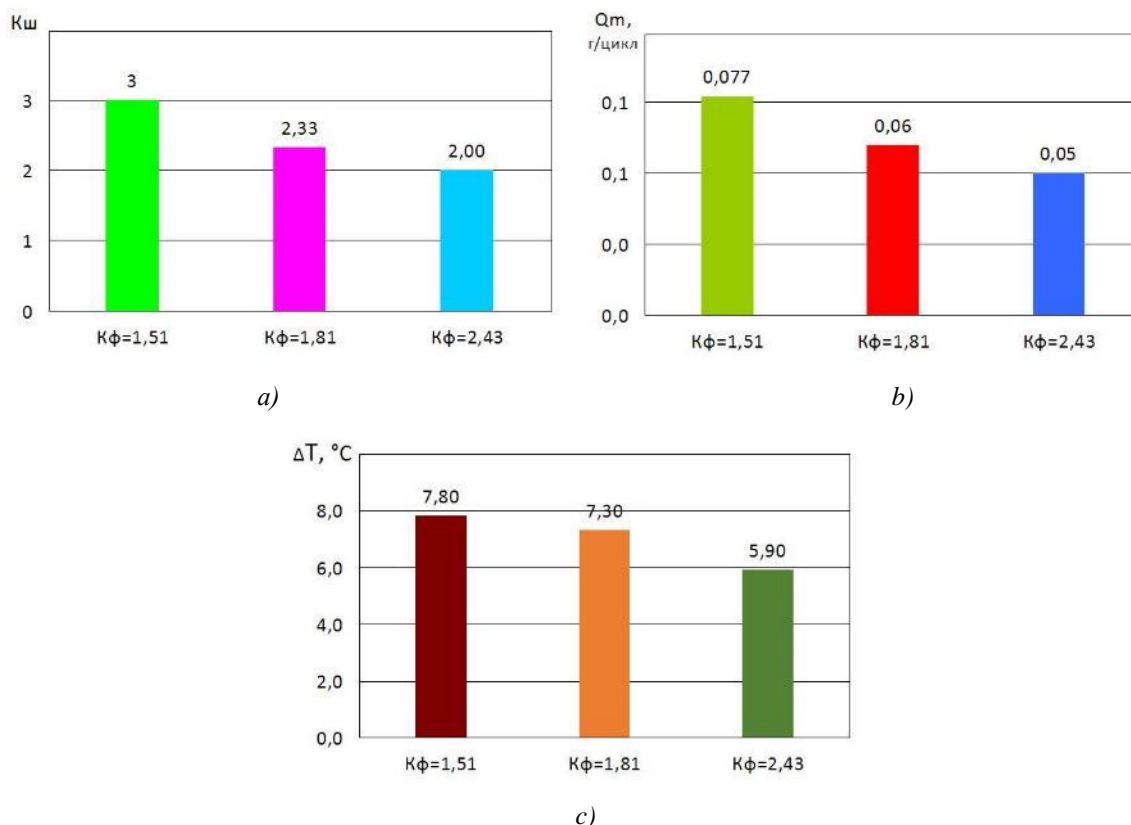


Рис. 15. Эксплуатационные показатели опытных кругов из зерен разной формы при плоском шлифовании заготовок из стали Р6М5 (HRC 63), где: (а) – коэффициент шлифования; (б) – режущая способность кругов; (с) – температура нагрева заготовок

Fig. 15. Exploitation abilities of experimental grinding wheels made of grains of different forms during flat grinding of workpieces made of M2 steel (HRC 63), where: (a) – grinding coefficient; (b) – cutting ability of wheels; (c) – heating temperature of workpieces

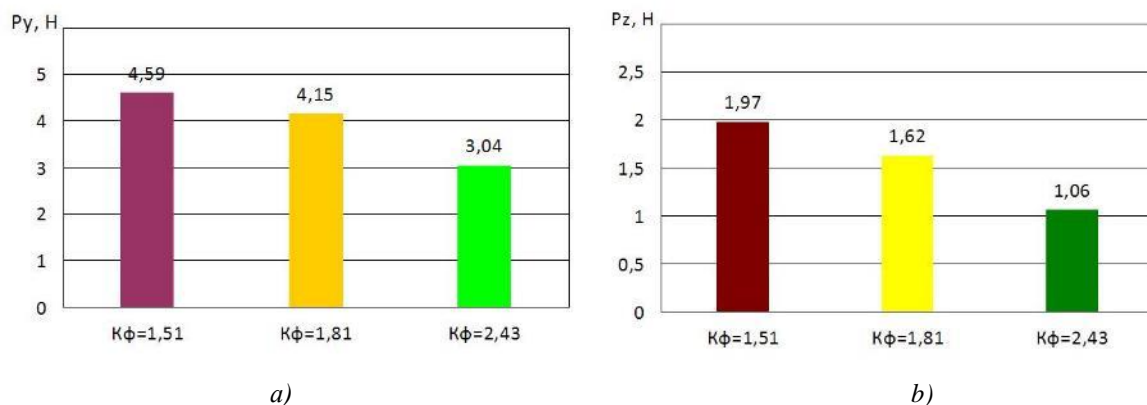


Рис. 16. Составляющие силы резания при плоском шлифовании опытными кругами заготовок из стали ШХ15 (HB 180), где: (а) – составляющая Py; (б) – составляющая Pz

Fig. 16. Components of cutting force during flat grinding of workpieces made of 52100 steel (HB 180) by experimental wheels, where: (a) – component Py; (b) – component Pz

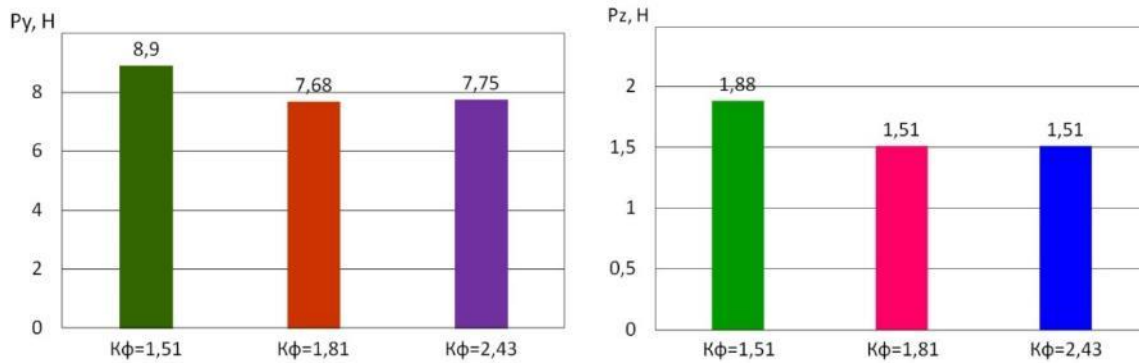
ния, режущей способности кругов и температур нагрева заготовок при плоском шлифовании заготовок из стали ШХ15 (HB 180) и стали Р6М5 (HRC 63) на станке 3Г71 опытными кругами с контролируемой формой зерен представлены на Рис. 14 и Рис. 15.

По результатам испытаний установлено, что:

- чем меньше коэффициент формы абразивных зерен в шлифовальных кругах, тем меньше их износ и выше коэффициент шлифования;

- коэффициент шлифования инструмента из изометрических зерен (Кф=1,51) на 9-29% выше по сравнению с инструментом из осколочных зерен (Кф=1,81) и на 28-50% выше по сравнению с инструментом из игольчато-пластинчатых зерен (Кф=2,43) при обработке заготовок из различных сталей;

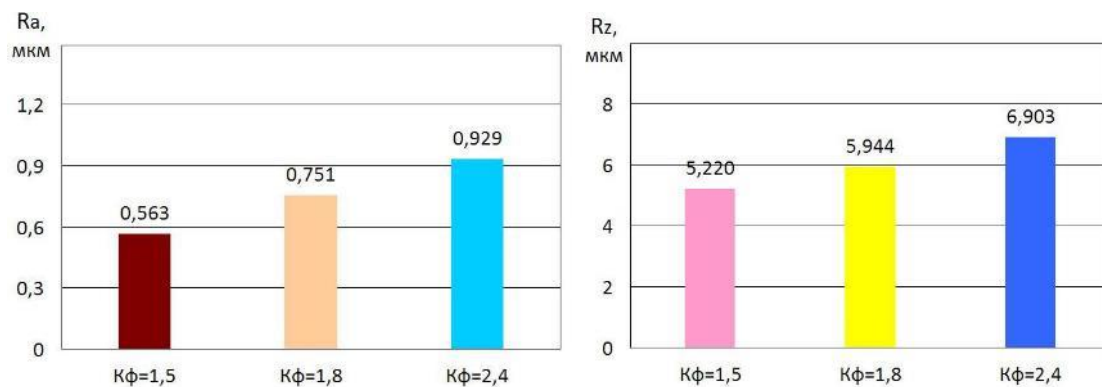
- различие в коэффициентах шлифования опытных кругов из зерен разной формы более выражено при шлифовании закаленной инструментальной



a) б)

Рис. 17. Составляющие силы резания при плоском шлифовании опытными кругами заготовок из стали Р6М5 (HRC 63), где: (а) – составляющая  $P_y$ ; (б) – составляющая  $P_z$

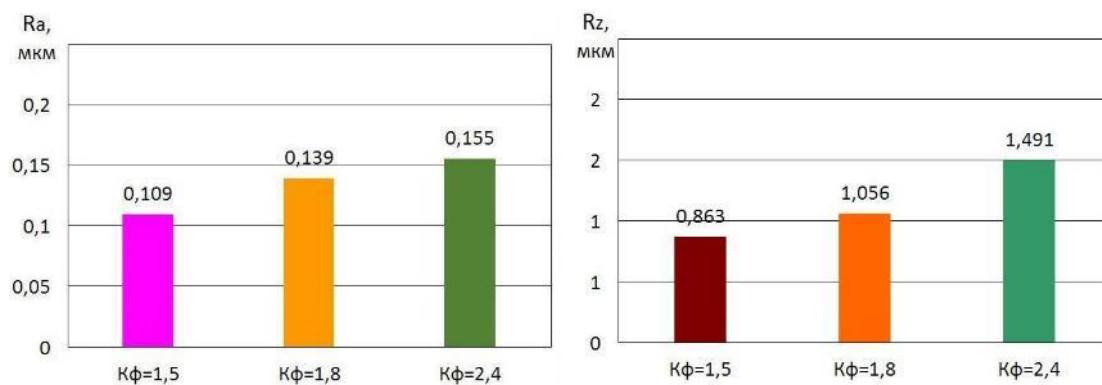
Fig. 17. Components of cutting force during flat grinding of workpieces made of M2 steel (HRC 63) by experimental wheels, where: (a) – component  $P_y$ ; (b) – component  $P_z$



a) б)

Рис. 18. Шероховатость заготовок из стали ШХ15 (HB 180) после плоского шлифовании опытными кругами, где: (а) – параметр  $R_a$ ; (б) – параметр  $R_z$

Fig. 18. Roughness of blanks made of 52100 steel (HB 180) after flat grinding by experimental wheels, where: (a) – parameter  $R_a$ ; (b) – parameter  $R_z$



a) б)

Рис. 19. Шероховатость заготовок из стали Р6М5 (HRC 63) после плоского шлифовании опытными кругами, где: (а) – параметр  $R_a$ ; (б) – параметр  $R_z$

Fig. 19. Roughness of blanks made of M2 steel (HRC 63) after flat grinding by experimental wheels, where: (a) – parameter  $R_a$ ; (b) – parameter  $R_z$

стали Р6М5 (HRC 63). Объясняются такие результаты тем, что с уменьшением коэффициента формы зерен увеличивается их прочность, за счет чего уменьшается износ шлифовальных инструментов.

Установлено также, что с уменьшением коэффициента формы зерен увеличивается режущая способность опытных кругов при плоском шлифо-

вании. У инструмента из изометрических зерен (Кф=1,51) она на 21-28% выше по сравнению с инструментом из осколочных зерен (Кф=1,81) и на 50-59% выше по сравнению с инструментом из игольчато-пластинчатых зерен (Кф=2,43) в зависимости от марки шлифуемой стали.

Результаты экспериментов также показывают, что с увеличением коэффициента формы зерен в кругах температуры нагрева заготовок снижаются. У инструмента из игольчато-пластинчатых зерен ( $K_f=2,43$ ) температура нагрева меньше на 10-19% по сравнению с инструментом из осколочных зерен ( $K_f=1,81$ ) и на 22-24% меньше по сравнению с инструментом из изометрических зерен ( $K_f=2,43$ ). Это дополнительно подтверждается результатами оценки составляющих сил резания при работе опытных кругов (Рис. 16, Рис. 17).

С увеличением коэффициента формы зерен, составляющие силы резания, уменьшаются, но несколько увеличивается их соотношение. У инструмента из игольчато-пластинчатых зерен ( $K_f=2,43$ ) составляющая сила резания  $P_y$  меньше на 3-27% по сравнению с инструментом из осколочных зерен ( $K_f=1,81$ ) и на 13-34% меньше по сравнению с инструментом из изометрических зерен ( $K_f=2,43$ ). По показателю  $P_z$  это уменьшение достигает 35% и 46% соответственно.

Соотношение  $P_y$  к  $P_z$  у инструмента из игольчато-пластинчатых зерен ( $K_f=2,43$ ) увеличивается до 12% по сравнению с инструментом из осколочных зерен ( $K_f=1,81$ ) и до 23% по сравнению с инструментом из изометрических зерен ( $K_f=1,51$ ).

Кроме того, установлено, что рецептура и эпоксидное связующее в опытных кругах обеспечивают эффективное шлифование ими легированной конструкционной стали ШХ15 в состоянии поставки (НВ180). Использование опытных кругов по закаленной быстрорежущей стали Р6М5 (HRC 63), напротив, оказалось малоэффективным.

При переходе от обработки стали ШХ15 (НВ180) к стали Р6М5 (HRC 63) износ инструментов повысился на 40–65%, режущая способность снизилась в 8-9 раз. Составляющие силы резания существенно возросли:  $P_y$  в 1,9-2,5 раза и  $P_z$  до 1,3 раза. Пропорционально возросли и соотношения  $P_y$  к  $P_z$  (в 1,8-2 раза). Кроме того, все опытные круги при обработке закаленной стали Р6М5 засаливались через 2-3 цикла и требовали правки, при этом эффективнее всего проявил себя инструмент из изометрических зерен, который шлифовал наиболее интенсивно и засаливался медленнее других.

Исследования шероховатости поверхностей, обработанных опытными кругами с контролируемой формой зерен (Рис. 18, Рис. 19), выявили явно выраженную зависимость – чем меньше коэффициент формы зерен и меньше (отрицательнее) их передние углы, тем ниже шероховатость. При шлифовании инструментом из изометрических зерен ( $K_f=1,51$ ) шероховатость  $R_a$  уменьшается на 22-25% по сравнению с обработкой инструментом из осколочных зерен ( $K_f=1,81$ ) и на 30-40% по сравнению с инструментом из игольчато-пластинчатых зерен ( $K_f=2,43$ ). По показателю  $R_z$  эта разница составляет соответственно 12-18% и 24-42% в зависимости от обрабатываемой марки стали.

Таким образом, по результатам испытаний установлено, что при плоском шлифовании лучше всего по основным эксплуатационным показателям

(коэффициенту шлифования режущей способности и шероховатости обработанных поверхностей) проявил себя инструмент из изометрических зерен. Инструмент из игольчато-пластинчатых зерен при плоском шлифовании имеет только одно преимущество – пониженный нагрев заготовок, но из-за прерывистой схемы обработки этот показатель здесь в большинстве случаев не является критичным. В связи с этим для повышения эффективности плоского шлифования сталей целесообразно рекомендовать круги из абразивных зерен изометрической формы.

#### Выводы

В представленной работе проведены исследования по повышению эффективности плоского шлифования путем создания и применения шлифовальных кругов с упорядоченной формой абразивных зерен и высокопористой структурой. Изготовлены и испытаны опытные круги из зерен марки 24А10Н (F120) с упорядоченной формой – из зерен изометрических, осколочных и игольчато-пластинчатых разновидностей, с порами из стеклянных микросфер марки МС-В. Для изготовления опытных кругов исходный абразив разделялся по форме на вибрационном сепараторе на фракции, форма зерен в которых дискретно изменялась.

Определены коэффициенты формы зерен во фракциях и исследована взаимосвязь передних углов зерен и их коэффициентов формы, а также взаимосвязь геометрических показателей зерен и эксплуатационных параметров шлифовальных кругов.

Испытания опытных кругов проводились на плоскошлифовальном станке модели ЗГ71. Обработывались заготовки из стали ШХ15 в состоянии поставки (НВ180) и из закаленной стали Р6М5 (HRC 63). В результате исследования геометрических характеристик абразивных зерен и испытаний опытных кругов установлено, что чем более вытянутую игольчато-пластинчатую форму имеют зерна и больше коэффициенты их формы, тем больше (острее) передние углы зерен и тем меньше составляющие силы резания, деформации обрабатываемого материала и температуры при шлифовании.

Применение в кругах для плоского шлифования зерен игольчато-пластинчатой формы позволяет снизить температуры нагрева заготовок на 10-19%. Установлено также, что для повышения эффективности плоского шлифования сталей по основным показателям следует применять в шлифовальных кругах абразивные зерна изометрической формы. Такое решение позволяет снизить износ кругов на 9-29% по сравнению со стандартным инструментом из исходного неупорядоченного по форме абразива, повысить режущую способность кругов на 21-28% и снизить шероховатость обрабатываемых поверхностей по параметру  $R_a$  на 22-25% и по параметру  $R_z$  на 12-18% в зависимости от обрабатываемой марки стали.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента /

под ред. А. М. Ковальчука. Москва : Машиностроение, 1984. 288 с.

2. Абразивные материалы и инструменты. Каталог / под ред. В. Н. Тыркова. Москва : ВНИИТЭМР, 1986. 358 с.

3. Sullivan J. Choosing The Right Grinding Wheel, Modern Machine Shop, 24.01.2020 [www.mmsonline.com/articles/choosing-the-right-grinding-wheel].

4. Goad D. Is Your Roll Grinding Wheel Being Used Efficiently? // Norton Abrasives, 16.09.2019 [www.nortonabrasives.com/en-us/resources/expertise/your-roll-grinding-wheel-being-used-efficiently].

5. Jackson M. J. A review of the design of grinding wheels operating at excessive speeds // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. № 94. Pp. 3979–4010. [link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-1131-2].

6. Klocke F., Barth S., Mattfield P. High Performance Grinding, Aachen University, ScienceDirect, Procedia CIRP. 2016. Vol. 46. Pp. 266–271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.067.

7. Коротков А. Н. Повышение эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов : монография. Кемерово : ГУ КузГТУ, 2005. 232 с.

8. Коротков А. Н. Эксплуатационные свойства абразивных материалов: монография / Изд-во Красноярского ун-та. Красноярск, 1992. 122 с.

9. Коротков В. А. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов: монография. Москва : Машиностроение, 2009. 178 с.

10. ГОСТ 9206–80. Порошки алмазные. Технические условия. Введ. 1981-07-01. Москва : Изд-во стандартов, 07.11.2012. 15 с.

11. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / под ред. А. Н. Резникова. Москва : Машиностроение, 1977. 391 с.

12. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами. М. : Машиностроение, 2007. 688 с., ил.

13. Коротков А. Н. (RU), Дубов Г. М. (RU), Баштанов В. Г. (RU) / Патент РФ № 2248851. Вибрационный сепаратор, 08.10.2003.

14. Коротков В. А., Мельников В. В. Изготовление и результаты испытаний экспериментальных кругов с применением в качестве связки эпоксидной смолы // Научно-технический прогресс: Актуальные и перспективные направления будущего: Сборник VI международной научно-практической конференции, 18.08.2017. Кемерово : ЗапСибНЦ, 2017. Т 2. С. 117–120.

15. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование. Ленинград : Машиностроение, 1979. 248 с.

16. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов. Москва : Машиностроение, 1985. 304 с.

© 2025 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Коротков Виталий Александрович**, к.т.н., доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: korotkov-va@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Коротков Виталий Александрович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, написание текста, выводы, сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Vitaly A. Korotkov

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

\* for correspondence: korotkov-va@mail.ru

## INCREASING GRINDING EFFICIENCY BY USING GRINDING WHEELS WITH ORDERED GRAIN SHAPE AND HIGHLY POROUS STRUCTURE



### Article info

Received:

12 February 2025

Accepted for publication:

01 March 2025

Accepted:

10 March 2025

Published:

24 March 2025

**Keywords:** Grinding, abrasive grain form, grain form coefficient, grain rake angles, highly porous grinding wheels, glass microspheres, grinding coefficient, cutting ability, cutting force components, roughness.

### Abstract.

The research in the field of creation and application of grinding wheels with ordered form of abrasive grains and high porous structure were conducted in the present work. Experimental wheels were made from grains with controlled form of white corundum grade 24A F120. Wheels were made from grains of isometric, fragmentary and needle-plate varieties, with pores from glass microspheres of grade MS-V. During the tests, blanks made of 52100 steel (AISI) in the delivery condition and of hardened steel M2 (AISI) were processed. To produce the experimental wheels, the original abrasive 24A F120 was separated by form parameter on a vibration separator into fractions, the form of the grains in which varied discretely. The coefficients of grain form in fractions were established and the relationship between the front angles of grains and their shape, as well as the relationship between the geometric parameters of grains and the work ability indicators of grinding wheels, were investigated. The results of testing experimental tools showed that the more elongated the needle-plate form of the grains and the greater their form coefficients, the sharper the front angles of the grains and the lower the components of the cutting force, deformation of the material being processed and the temperature during grinding. It was also found that the most effective is usage of isometric grains in grinding wheels for flat grinding. This allows to reduce the wear out of the grinding wheels by 9-29% compared to a standard tool made from the original abrasive, to increase the cutting ability of the wheels by 21-28% and to reduce the roughness of the processed surfaces by the Ra parameter on 22-25% and by the Rz parameter on 12-18% depending on the processed material.

**For citation:** Korotkov V.A. Increasing grinding efficiency by using grinding wheels with ordered grain shape and highly porous structure. Mining Equipment and Electromechanics, 2025; 1(177):25-38 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-25-38, EDN: FKGREN

### REFERENCES

1. Kovalchuk A.M. Fundamentals of design and manufacturing technology of abrasive and diamond tools. Moscow: Mechanical Engineering; 1984.
2. Tyrkov V.N. Abrasive materials and instruments. Catalogue, All-Russian Research Institute of Information and Feasibility Studies in Mechanical Engineering and Robotics. Moscow, 1986.
3. Sullivan J. Choosing The Right Grinding Wheel, Modern Machine Shop, 24.01.2020 [www.mmsonline.com/articles/choosing-the-right-grinding-wheel].
4. Goad D. Is Your Roll Grinding Wheel Being Used Efficiently? Norton Abrasives. 16.09.2019 [www.nortonabrasives.com/en-us/resources/expertise/your-roll-grinding-wheel-being-used-efficiently].
5. Jackson M.J. A review of the design of grinding wheels operating at excessive speeds. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018; 94:3979–4010 [link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-1131-2].
6. Klocke F., Barth S., Mattfield P. High Performance Grinding, Aachen University, ScienceDirect, Procedia CIRP. 2016; 46:266–271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.067.
7. Korotkov A.N. Increase of operational opportunities of grinding tools. Publishing House of Kuzbass State Technical University. Kemerovo, 2005.
8. Korotkov A.N. Operational properties of abrasive materials. Publishing House of Krasnoyarsk University. Krasnoyarsk, 1992.

9. Korotkov V.A. Increase of operational opportunities of cutting discs. Moscow: Mechanical Engineering; 2009.

10. GOST 9206–80. Diamond powders. Specifications. Introduced 1981-07-01. Moscow: Publishing house of standards; 07.11.2012.

11. Reznikov A.N. Abrasive and diamond processing of materials. Handbook. Moscow: Mechanical Engineering; 1977.

12. Starkov V.K. Grinding by high porous wheels. Moscow: Mechanical Engineering; 2007.

13. Korotkov A.N. (RU), Dubov G.M. (RU), Bashtanov V.G. (RU) / Russian Federation Patent № 2248851, Vibrating separator, 10.08.2003.

14. Korotkov V.A., Melnikov V.V., Manufacture and test results of experimental grinding wheels using epoxy as a binder. *Scientific technical progress : Actual and perspective directions of future : Digest of VI international scientific practical conference*. 18.08.2017. Kemerovo. West Siberian scientific center. 2017; 2:117–120.

15. Filimonov L.N. High-speed polishing. Leningrad: Mechanical Engineering; 1979.

16. Granovsky G.I., Granovsky V.G. Cutting of metals. Moscow: High School; 1985.

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*The authors declare no conflict of interest.*

*About the author:*

**Vitaly A. Korotkov**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28 Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russia), e-mail: korotkov-va@mail.ru

*Contribution of the authors:*

Vitaly A. Korotkov – formulation of a research task, scientific management, conceptualization of research, writing text, conclusions, data collection and analysis.

*Authors have read and approved the final manuscript.*

