

УДК 621.922.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ АБРАЗИВНЫХ ЗЁРЕН НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КРУГЛОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Коротков Виталий Александрович<sup>1,2</sup>,  
кандидат техн. наук, доцент, e-mail: [korotkov-va@mail.ru](mailto:korotkov-va@mail.ru)

<sup>1</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия,  
г. Томск, проспект Ленина, 30

**Аннотация:** Проведены комплексные испытания шлифовальных кругов, при изготовлении которых абразивные зёरна целенаправленно ориентировали в различных направлениях посредством электростатического поля (Патент РФ №2369474). Исследовано влияние ориентации абразивных зёрен на режущую способность, коэффициент шлифования и эффективную мощность резания шлифовальных кругов, а также на шероховатость обрабатываемых ими поверхностей при круглом врезном шлифовании.

Установлено, что управление геометрией зёрен посредством их целенаправленного ориентирования в шлифовальных инструментах позволяет существенно повысить эффективность процесса шлифования. С увеличением передних углов зёрен за счёт их радиальной ориентации в шлифовальных кругах повышается режущая способность инструментов, снижаются деформации обрабатываемого материала, а также силы и температуры при шлифовании. Уменьшение передних углов зёрен и напряжений в них при работе посредством тангенциального ориентирования зёрен в кругах позволяет существенно снизить шероховатость шлифуемых поверхностей и уменьшить износ инструментов.

**Ключевые слова** шлифование, шлифовальные круги, абразивные зёрна, угол ориентации зёрен, коэффициент формы зёрен, передние углы и напряжения в зёдрах, режущая способность, коэффициент шлифования, эффективная мощность резания кругами, шероховатость обработанных поверхностей.

### Введение

Эффективность процесса шлифования и работоспособность шлифовальных инструментов зависят от многих факторов, в числе которых свойства обрабатываемого материала, марка и зернистость применяемого абразива, тип связующего, твердость и структура инструмента, схема и режимы обработки и др. Вместе с тем, работоспособность шлифовальных инструментов, также как и любых других инструментов, реализующих процесс резания, во многом определяется геометрией режущих клиньев. Применительно к шлифовальным инструментам, которые реализуют процесс группового резания множеством отдельных зёрен, геометрия этих клиньев определяется двумя параметрами – формой зёрен и пространственной ориентацией в теле инструмента. Существуют технологии, направленные на упорядочение геометрии зёрен. Так, форму зёрен, получаемых дроблением абразивных слитков, несколько изменяют путём регулирования скорости охлаждения расплава абразива или посредством операции овализации зёрен. Изготавливают также зёдра заданной формы – сферокорунды и формокорунды. Известны технологии изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зёздами, например, шлифовальных шкурок и лент, у которых зёдра ориентируют перпендикулярно основе воздей-

ствием электростатического поля. Упорядочение геометрии зёрен в шлифовальных инструментах как за счёт подбора их формы, так и за счёт целенаправленной ориентации позволяет существенно повысить работоспособность инструментов и эффективность шлифования. Дальнейшие перспективы здесь видятся в области создания инструментов, в которых одновременно учитывались бы и целенаправленно регулировались оба параметра – форма и ориентация зёрен. Для этого необходимы новые эффективные технологии по ориентированию зёрен у широкой номенклатуры шлифовальных инструментов на стандартных типах связующих – бакелитовой, керамической и других связках. В настоящее время в промышленном масштабе производятся инструменты с ориентированными зёздами и однослойным их расположением (например, шлифовальные шкурки и ленты), а также инструменты с металлизированными зёздами и соответствующим типом связующего. Большинство других известных технических решений в этой области пока не вышли из стадии опытных разработок ввиду своей сложности, дороговизны и малой производительности.

Представленная статья описывает апробацию новой технологии изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зёздами [1] и эффективности применения шлифовальных кру-

гов с различными направлениями ориентации зёрен, изготовленными на её базе.

В основу разработанного способа изготовления шлифовальных кругов с ориентированными зёрнами (патент РФ №2369474) положено действие электростатического эффекта (рис. 1). Суть способа состоит в том, что исходные зёरна (обычные, либо с контролируемой формой) смешивают с увлажнителями, связующими и наполнителями и образующуюся абразивную смесь 9 начинают просеивать через выбирающее сито 10. Абразивные гранулы 11, падая вниз в прессформу в виде множества отдельных частиц, попадают в зону действия электростатического поля, созданного электродами 6, ориентируются в нём длинными осями вдоль силовых линий поля и постепенно заполняют прессформу. Электроды из тонкого листового металла собраны в единую конструкцию с помощью корпуса 7 из диэлектрика и могут иметь различное расположение, в зависимости от

требуемой ориентации зёрен: кольцевое – для радиальной ориентации зёрен, радиальное расположение – для тангенциальной ориентации зёрен, наклонное расположение – для ориентации зёрен в теле инструмента под некоторым углом.

Конструкция прессформы включает основание 1, выталкиватель 2 и сердечник 3. Вместо выталкивателя 2 могут применяться подкладные упоры с размерами, обеспечивающими требуемую высоту формуемых инструментов. После заполнения прессформы укладку абразивной смеси прекращают, электроды извлекают из прессформы вертикально вверх, при необходимости наружную поверхность слоя абразивной смеси разравнивают и удаляют излишки, после чего осуществляют формование, извлекают заформованный инструмент из прессформы и подвергают термообработке. При изготовлении шлифовальных кругов с упрочняющими элементами в виде армирующих стеклосеток и втулок электроды вводят и извле-

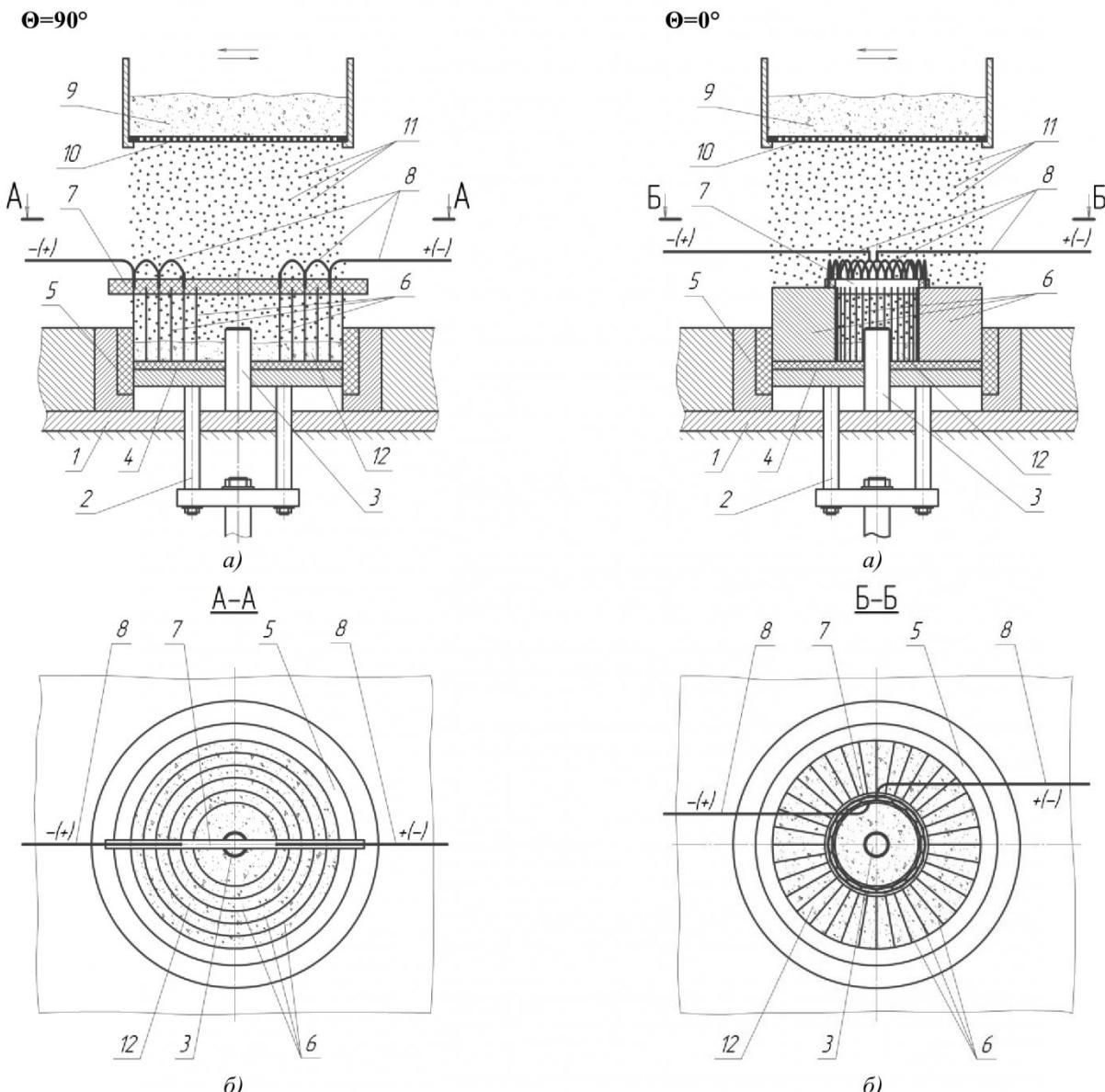


Рис. 1. Укладка абразивной смеси (а) и расположение электродов (б) при радиальной ( $\Theta=90^\circ$ ) и тангенциальной ( $\Theta=0^\circ$ ) ориентации зёрен в круге

кают из прессформы в соответствии с количеством укладываемых слоев абразивной смеси между сетками, а втулку укладывают у посадочного отверстия непосредственно перед формированием.

Предлагаемый способ позволяет изготавливать шлифовальные круги с различными направлениями ориентации зёрен (радиальным, тангенциальным, наклонным), на разных типах связок, обеспечивает высокую размерную точность изделий, наличие в них, при необходимости, упрочняющих элементов и повышает эксплуатационные возможности инструментов.

По описанной технологии изготовлены отрезные шлифовальные круги на бакелитовой связке, армированные стеклосетками и втулками с характеристикой  $230 \times 4 \times 32$  13AF46 [Θ] T2 БУ 80 м/с (Туре 41 230×4×32 A 46 [Θ] С BF 80 m/s). В частности, изготавливались и испытывались отрезные круги с радиальной ориентацией зёрен, т.е. их пространственным расположением вдоль радиусов, в направлении от центра к периферии круга ( $\Theta=90^\circ$ ). Также исследовались отрезные круги с тангенциальной ориентацией зёрен ( $\Theta=0^\circ$ ), при которой наибольшие оси зёрен располагались параллельно плоскости резания. Кроме того, в качестве сравнительного эталона испытывались обычные отрезные круги без ориентации шлифовальных зёрен ( $\Theta=\text{var}$ ), изготовленные из той же абразивной смеси, на том же оборудовании и за один технологический цикл. Для изготовления опытных кругов всех разновидностей использовались зёरна нормального электрокорунда 13AF46, которые специально не подвергались сортировке по форме с целью обеспечения наблюдения за изменением эксплуатационных показателей тестируемых кругов только от влияния одного фактора – ориентации зёрен, без смешивания его со вторым фактором – формой зёрен, что затрудняло бы последующий анализ и понимания сути получаемых результатов. Тем не менее, форма зёрен, из которых изготавливались круги, контролировалась. Методом количественной оценки формы зёрен в трёхмерном пространстве установлено, что средний коэффициент формы зёрен во фракции составил  $K_\phi \approx 2,4$ . Коэффициент формы в данном случае определялся как отношение диаметров описанных и вписанных в зерна сфер [2].

#### **Методика экспериментального исследования**

Круги испытывались при двух схемах шлифования – отрезке с постоянным усилием прижатия заготовок ( $P_y=\text{const}$ ) [3] и отрезке по схеме круглого врезного шлифования ( $S_{\text{круга}}=\text{const}$ ). Схема с постоянной подачей инструмента является более распространённой и позволяет экстраполировать получаемые результаты на другие операции шлифования. Поэтому в статье приведены результаты испытания шлифовальных кругов с ориентированными зёрами по схеме круглого врезного шлифования.

Для проведения испытаний использован стенд на базе токарно-винторезного станка модели 1К62 с закреплённой в резцодержателе угловой шлифовальной машинкой (рис. 2). Здесь заготовка 1 устанавливается в патрон токарного станка. Отрезной шлифовальный круг 2 закреплён на шпинделе угловой шлифовальной машинки 3, которая жёстко закреплена на резцодержателе токарного станка. Частота вращения заготовки и величина подачи круга регулируются коробкой скоростей 4 и коробкой подач 5 токарного станка. Амперметр 6, встроенный в цепь УШМ служит для оценки эффективной мощности резания.

В качестве заготовок при проведении испытаний использовались трубы  $21,3 \times 2,8$  из стали 10, трубы  $20 \times 2$  из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и трубы  $20 \times 2$  из стали ШХ15, закалённые в масле на твёрдость 60 HRC. Такой выбор заготовок обусловлен стремлением испытать опытные круги на стальных из разных групп, отличающихся по химическому составу и по типу кристаллической структуры.

Испытания проводились при рабочей скорости кругов 80 м/с и на предварительно подобранных рациональных режимах резания [4]. Частота вращения заготовок составляла 31,5 об/мин, а поперечная подача кругов – 0,084 мм/об. При испытаниях исследовались:

- режущая способность кругов ( $Q_m$ ) (производительность шлифования), определяемая отношением массы снятого материала заготовки ко времени обработки;

- коэффициент шлифования ( $K_{\text{ш}}$ ), вычисляемый через отношение массы снятого материала заготовки к израсходованной массе круга;

- эффективная мощность резания ( $W_{\text{эф}}$ ), характеризующая уровень энергозатрат при работе шлифовального круга и выражаемая через разницу мощностей рабочего и холостого ходов;

- шероховатость обработанных торцевых поверхностей заготовок ( $R_a$ ).

Для измерения масс кругов и заготовок использовались лабораторные весы с ценой деления 0,01 г, время обработки фиксировалось с точностью до 0,1 с, а измерения шероховатости производились на профилографе-профилометре Talysurf 5-120 фирмы Taylor-Hobson.

#### **Результаты и обсуждение**

Результаты испытаний представлены в виде диаграмм на рис. 3. Они свидетельствуют, что при реализации предложенного способа изготовления шлифовальных инструментов достигается не только визуально фиксируемое (при укладке абразивной смеси в прессформу) ориентирование шлифовальных зёрен, но также и ощутимая разница эксплуатационных показателей готовых кругов.

Так, при рассматриваемой схеме шлифования переход от тангенциальной ориентации шлифовальных зёрен в инструментах ( $\Theta=0^\circ$ ) к радиаль-

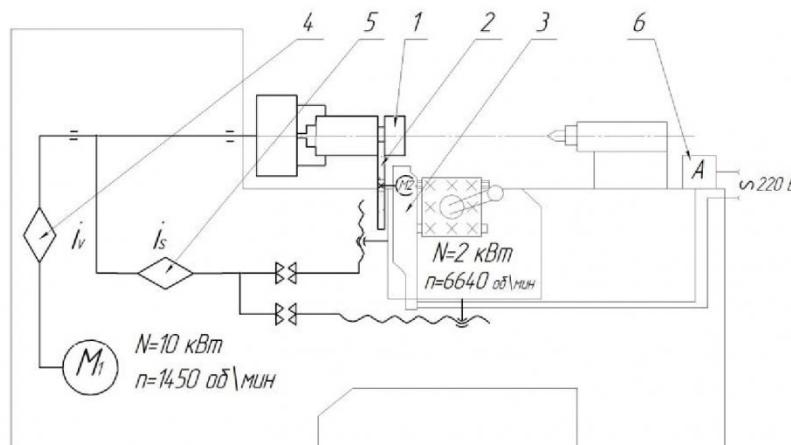


Рис. 2. Испытательный стенд на базе токарного станка с закреплённой УШМ для испытания отрезных кругов по схеме круглого шлифования

ному их расположению ( $\Theta=90^\circ$ ) сопровождается увеличением режущей способности кругов в  $1,11\div1,14$  раза, в зависимости от обрабатываемого материала (рис. 3, a).

Режущая способность отрезных кругов с тангенциально ориентированными зёренами на  $3,9\div4,4$  % ниже, чем у обычных кругов с произвольно расположенными зёренами ( $\Theta=\text{var}$ ). У кругов с радиальной ориентацией зёрен, напротив, режущая способность на  $6,6\div8,7$  % выше, чем у стандартных инструментов.

Причиной роста режущей способности шлифовальных кругов при переходе от тангенциальной ориентации зёрен ( $\Theta=0^\circ$ ) к радиальному их расположению в теле инструментов ( $\Theta=90^\circ$ ) является различие величин углов резания при различных направлениях ориентации зёрен. В частности, радиально расположенные зёра имеют большие передние углы, по сравнению с произвольно ориентированными и тангенциально ориентированными зёренами [5]. Соответственно, такие зёра при одинаковых режимах резания вызывают меньшие деформации обрабатываемого материала и эффективнее участвуют в процессе резания по сравнению с неориентированными или тангенциально ориентированными зёренами, что подтверждается результатами оценки эффективной мощности резания. Так, при рассматриваемой схеме шлифования переход от использования тангенциально ориентированных зёрен ( $\Theta=0^\circ$ ) к радиальному их расположению ( $\Theta=90^\circ$ ) сопровождается снижением эффективной мощности резания в  $1,35\div1,59$  раза, в зависимости от материала заготовок (рис. 3, б). При работе отрезных кругов с тангенциально ориентированными зёренами она на  $5,6\div19,4$  % выше, чем у обычных инструментов из неориентированных зёрен ( $\Theta=\text{var}$ ). У отрезных кругов с радиальной ориентацией зёрен эффективная мощность резания на  $21,5\div24,8$  % ниже, чем у стандартных инструментов. Полученные результаты имеют общую физическую основу с характером влияния геометрии режущих клиньев лезвийных инструментов на составляющие силы резания.

По результатам испытаний также установлено, что ориентация зёрен существенно влияет на износ шлифовальных кругов (рис. 3, б). Так, переход от тангенциального направления ориентации зёрен в кругах ( $\Theta=0^\circ$ ) к радиальному их расположению ( $\Theta=90^\circ$ ), сопровождается снижением коэффициента шлифования инструментов в  $1,43\div1,72$  раза (в зависимости от обрабатываемого материала). Коэффициент шлифования кругов с тангенциальными зёренами на  $20,9\div27,2$  % выше, чем у обычных кругов из неориентированных зёрен ( $\Theta=\text{var}$ ). У отрезных кругов с радиальной ориентацией зёрен, напротив, коэффициент шлифования на  $15,2\div26,2$  % ниже, чем у стандартных инструментов.

Причиной снижения коэффициентов шлифования отрезных кругов при переходе от тангенциального ( $\Theta=0^\circ$ ) к радиальному направлению ориентации шлифовальных зёрен ( $\Theta=90^\circ$ ) является повышение уровня сжимающих напряжений в зёрах и, как следствие, интенсификация износа последних [5, 6]. В частности, установлено, что наименьшие напряжения возникают в изометрических зёрах (с минимальными  $K_\phi$ ) и при тангенциальной ориентации зёрен, что соответствующим образом отражается на прочности и стойкости зёрен, а также на износе инструментов [7]. При этом, радиальная ориентация зёрен не является максимально эффективной как по параметру режущей способности инструментов, так и по интенсивности их износа. Дело в том, что передние углы зёрен достигают максимальных значений при их ориентации вершинами навстречу силе резания ( $\Theta=22,5\div90^\circ$ ), в особенности в диапазоне углов ориентации  $\Theta=22,5\div45^\circ$ , а наименьшие напряжения в зёрах (после варианта тангенциальной ориентации) наблюдаются при их расположении соосно силе резания. Исходя из того, что соотношение составляющих силы резания  $P_y$  и  $P_z$  для различных операций шлифования, как правило, колеблется в интервале от 2:1 до 10:1, то рациональные углы ориентации зёрен находятся в диапазоне  $\Theta=63\div84^\circ$ . Для отрезных шлифовальных кругов, при эксплуатации которых соотношение

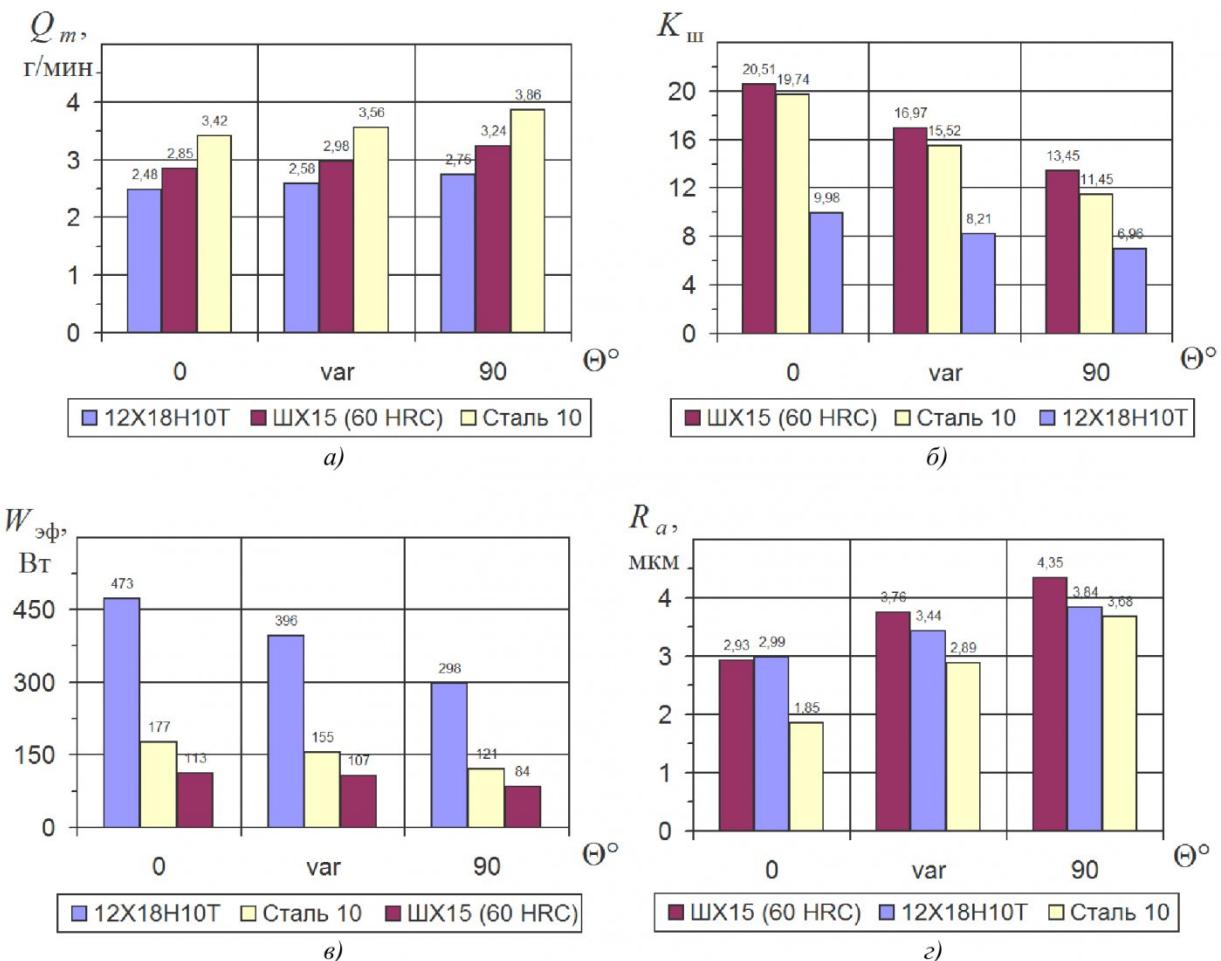


Рис. 3. Влияние угла ориентации ( $\Theta$ ) на режущую способность (а), коэффициент шлифования (б), эффективную мощность резания (в) и шероховатость обработанных поверхностей (г) при работе кругов  $230 \times 4 \times 32$  13AF46 [ $\Theta$ ] T2 БУ 80 м/с по схеме круглого врезного шлифования

$P_y$  и  $P_z$  изменяется в диапазоне от 3:1 до 5:1, может быть рекомендован рациональный интервал углов ориентации зёрен порядка  $\Theta=65\div75^\circ$ .

Результаты исследований шероховатости поверхностей, обработанных кругами с ориентированными зёrnами (рис. 3, г), демонстрируют, что независимо от марки шлифуемого материала прослеживается общий характер влияния ориентации зёрен на этот показатель. Он выражается в том, что уменьшение или увеличение передних углов шлифовальных зёрен в кругах посредством их целенаправленной ориентации сопровождается, соответственно, снижением или увеличением шероховатости обрабатываемых поверхностей. Режущие микроклинья с большими передними углами оставляют более глубокие риски, в то время как зёrnна, характеризующиеся меньшими величинами передних углов, шлифуют с большими деформациями обрабатываемого материала и сильнее выглаживают обрабатываемую поверхность. Дополнительно это подтверждается исследованиями микротвёрдости поверхностей, обработанных кругами с ориентированными зёrnами [7], которые показывают, что уменьшением передних углов зёрен приводит к увеличению глубины и ин-

тенсивности поверхностного упрочнения (наклёпа) на шлифуемых поверхностях.

Дополнительное влияние на шероховатость оказывает характер износа зёрен при различных углах ориентации. Для тангенциально ориентированных зёрен характерен износ с образованием площадок, а для радиально ориентированных зёрен – износ скальванием, объёмным разрушением и быстрым вырывом из связки, что отражается на рельфе рабочей поверхности кругов – его большей развитости и разновысотности режущих клиньев, и на шероховатости обработанных поверхностей.

В результате, при переходе от тангенциальной к радиальной ориентации зёрен в кругах происходит увеличение шероховатости обрабатываемых поверхностей в 1,3÷2 раза, в зависимости от материала заготовок. Использование шлифовальных кругов с тангенциальной ориентацией зёрен ( $\Theta=0^\circ$ ) позволяет снизить шероховатость поверхности на 13÷36 % по сравнению с вариантом применения инструментов с неориентированными зёrnами ( $\Theta=\text{var}$ ). Использование кругов с радиальной ориентацией зёрен ( $\Theta=90^\circ$ ), напротив,

приводит к повышению шероховатости обрабатываемых поверхностей на 12÷27 %.

Полученные результаты также показывают, что регулирование геометрии зёрен оказывает наибольший эффект на изменение шероховатости поверхностей заготовок из стали 10 с перлитной структурой. Далее, по убыванию влияния геометрии зёрен, следует обработка заготовок из стали ШХ15 (60 HRC) с мартенситной структурой. Меньше всего эффект влияния ориентации зёрен на шероховатость поверхностей проявляется на заготовках из стали 12X18H10T с аустенитной структурой (наиболее труднообрабатываемой из представленных).

### **Выводы**

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Пат. 2369474 РФ, МПК<sup>7</sup> В 24D 18/00. Способ изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зёрнами / В. А. Коротков. – № 2008105086 ; заявл. 11.02.08 ; опубл. 10.10.09. Бюл. № 28.
2. Коротков В. А. Оценка формы и площади поверхности шлифовальных зёрен в трехмерном пространстве // Обработка металлов. – 2007. – № 2. – С. 27–29.
3. Коротков, В. А. Исследование эксплуатационных показателей отрезных шлифовальных кругов с ориентированными шлифовальными зёрнами // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 4. – С. 61–65.
4. Коротков В. А. Реализация способа ротационно-абразивной отрезки на токарных станках в условиях мелкосерийного производства / В. А. Коротков, А. А. Дурсенев, К. Л. Квасов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 2. – С. 61–67.
5. Коротков В. А. Взаимосвязь геометрии и напряжений в ориентированных шлифовальных зёрнах / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – № 8. – С. 46–49, 57.
6. Коротков В. А. Геометрия и напряжённое состояние ориентированных шлифовальных зёрен с контролируемой формой / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // Обработка металлов. – 2014. – № 2. – С. 62–77.
7. Коротков В. А. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов : монография. – Москва : Машиностроение, 2009. – 178 с.

*Поступило в редакцию 05.10.2015*

**УДК 621.922.3**

### **RESEARCH OF ORIENTATION INFLUENCE OF THE ABRASIVE GRAINS ON THE EXPLOITATION ABILITIES OF THE GRINDING WHEELS DURING REALIZATION OF THE ROUND PLUNGE GRINDING**

**Korotkov Vitaliy A.<sup>1,2</sup>,**  
C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: korotkov-va@mail.ru

<sup>1</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Vesennaja Street, 28, Kemerovo, 650000, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation

**Abstract** The complex researches of exploitation abilities of the grinding wheels with oriented abrasive grains are made. These polishing instruments have been produced by the Russian Federation patent №2369474, which is based on the electrostatic effect. The influence of the abrasive grain orientation on the productivity (cutting ability), grinding coefficient and effective power of cutting and surface roughness during round plunge grinding is established.

*It has been established that the management of the geometry of the abrasive grains through their purposeful orientation in grinding tools can significantly improve the efficiency of the grinding process. Increasing the front angles of abrasive grains due to their radial orientation in grinding wheels improves the tool cutting ability,*

Таким образом, показано, что управление ориентацией зёрен, наряду с упорядочением их формы, открывает перспективу повышения эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов. При этом, на этапе проектирования инструментов с упорядоченной геометрией зёрен целесообразно учитывать особенности конкретной операции шлифования и параметры силового нагружения, а также влияние формы и ориентации зёрен на геометрические, прочностные и стойкостные показатели как самих зёрен, так и шлифовальных инструментов. Такой подход позволяет более результативно использовать потенциальные возможности зёрен, находящихся в инструменте, и тем самым повысить эффективность шлифования.

*reduces deformation of the processed material, as well as the strength and the temperature during grinding. Reduction of the front angles of the abrasive grains and tension value therein by tangential orientation in grinding wheels can significantly reduce the grinding surface roughness and reduce tool wear.*

**Keywords** grinding process, grinding wheels, abrasive grains, abrasive grain orientation angle, abrasive grain form coefficient, abrasive grain front angles and tension value, cutting ability, grinding coefficient, effective power of cutting, surface roughness

## REFERENCES

1. Korotkov V.A. Sposob izgotovleniya shlifoval'nykh instrumentov s orientirovannymi zernami [A manufacturing method of grinding tools with oriented grains] Russian Federation Patent 2,369,474. (2009).
2. Korotkov V.A. Otsenka formy i ploshchadi poverkhnosti shlifoval'nykh zeren v trekhmernom prostranstve [Evaluation of form parameter and the surface area of the grinding grains in three dimensions], Processing of metals, 2007, № 2, pp. 27-29. (rus)
3. Korotkov V.A. Issledovanie ekspluatatsionnykh pokazateley otreznykh shlifoval'nykh krugov s orientirovannymi shlifoval'nyimi zernami [Research of exploitation characterizations of cutting discs with oriented abrasive grains], Bulletin of Kuzbass State Technical University, 2014, № 4, pp. 61-65. (rus)
4. Korotkov V.A., Dursenev A.A., Kvasov K.L. Realizatsiya sposoba rotatsionno-abrazivnoy otrezki na tokarnykh stankakh v usloviyakh melkoseriynogo proizvodstva [Implementation of the method of rotational abrasive cutting on lathes in small-scale production], Bulletin of Kuzbass State Technical University, 2014, № 2, pp. 61-67. (rus)
5. Korotkov V.A., Minkin E.M. Vzaimosvyaz' geometrii i napryazheniy v orientirovannykh shlifoval'nykh zernakh [The relationship of geometry and tension value in oriented abrasive grains], Handbook. Engineering magazine, 2014, № 8, pp. 46-49, 57. (rus)
6. Korotkov V.A., Minkin E.M. Geometriya i napryazhennoe sostoyanie orientirovannykh shlifoval'nykh zeren s kontroliruemoy formoy [The geometry and tension value in oriented abrasive grains with a controlled form], Processing of metals, 2014, № 2, pp. 62-77. (rus)
7. Korotkov V.A. Povyshenie ekspluatatsionnykh vozmozhnostey otreznykh shlifoval'nykh krugov [Increasing of exploitation abilities of cutting discs]. Moscow: "Mechanical engineering", 2009. 178 p. (rus)

*Received 5 October 2015*