

В диссертационный совет 24.2.332.01  
на базе ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
Ученому секретарю совета Сотовой Е.С.  
127055, г. Москва, ГСП-4, Вадковский  
переулок, д. 1

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Короткова Виталия Александровича:  
«Повышение эффективности шлифования сталей путем создания и  
применения абразивных инструментов с заданной формой и ориентацией  
зерен», представленную на соискание ученой степени доктора технических  
наук по специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и  
физико-технической обработки»

Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом специальности ВАК 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» (технические науки) и относится к п. 3 и 4 направлений исследований паспорта специальности: «Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки»; «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров рабочего инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки».

### **1. Актуальность темы диссертации**

Известно, что шлифовальные инструменты не полностью используют свои эксплуатационные возможности. Одними из основных причин, снижающих их работоспособность, являются неупорядоченность формы зерен и хаотичность расположения их в теле инструмента. Практически все зерна, входящие в состав шлифовальных инструментов и изготавливаемых по традиционным технологиям, имеют произвольную форму, которая

изменяется в широком диапазоне конфигураций от изометрических до игольчато-пластинчатых. Процесс резания такими зёрнами осуществляется по-разному, и лишь в некоторых случаях, когда режущий клин зерна имеет благоприятную для резания геометрию, этот процесс протекает эффективно. В других, более многочисленных случаях, зёрна быстро разрушаются и удаляются из связки, либо преимущественно деформируют обрабатываемый материал с интенсивным, выделением тепла и частичным срезанием стружки. Поэтому шлифовальные зерна работают не в полную силу и используют не все свои потенциальные возможности. Поскольку, шлифование представляет собой совокупный процесс микрорезания отдельными зёрнами, то необходимо совершенствовать и упорядочивать геометрию отдельных режущих элементов – зерен. Этот процесс представляет собой сложную, но актуальную и важную проблему. Поскольку геометрия режущего клина шлифовального зерна формируется двумя факторами – его формой и расположением в теле инструмента, то для решения данной проблемы необходимо заниматься также вопросами ориентации зерен.

Таким образом, существует большой потенциал незадействованных возможностей шлифовальных инструментов, формируемый фактом существования зерен с произвольной формой и хаотичным расположением их в теле таких инструментов. Можно существенно повысить работоспособность отдельных шлифовальных зерен и инструментов в целом, если научно-обосновано подходить к проблеме выбора формы зерен и их ориентации.

Актуальность работы подтверждена двумя грантами, государственным контрактом № 7.2398.2011 и государственным заданием Минобрнауки РФ (проект № FSFS-2025-0006).

Считаю, что диссертационная работа Короткова В.А. соответствует требованиям ВАК п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней».

## 2 Оценка новизны исследований и результатов

Оппонент в целом согласен с предлагаемыми в диссертационной работе характеристиками ее научной новизны, которая состоит в следующем:

**Научная новизна** диссертации состоит в разработке принципов создания абразивных инструментов с заданной формой и ориентацией зерен, позволяющих упорядочить внутреннее строение таких инструментов и управлять геометрией его зерен, что обеспечивает повышение эксплуатационных возможностей инструментов и эффективность процесса шлифования.

Решение задач, поставленных в работе достигается путем: установления и математического описания взаимосвязи формы зерен с развитостью и размером площади их поверхности, а также с количеством зерен в единице объема; оценке совместного влияния формы и ориентации зерен на величины их передних углов, на напряжения, возникающие в зернах при работе, а также на прочность и стойкость зерен; за счет установления влияния формы и ориентации зерен на эксплуатационные показатели шлифовальных инструментов: режущую способность, коэффициент шлифования, мощность и температуру резания; на основе изучения влияния формы и ориентации зерен на качество шлифуемых поверхностей: микротвердость и микроструктуру поверхностного слоя, а также шероховатость обрабатываемых поверхностей.

Общим результатом комплекса проведенных исследований является повышение эффективности шлифования сталей по показателям производительности обработки, стойкости инструментов и качества обрабатываемых поверхностей путем создания и рационального применения абразивных инструментов с заданной формой и ориентацией зерен, а также новые технические и технологические решения по производству абразивных инструментов с упорядоченной геометрией режущих элементов и улучшенным внутренним строением абразивного композита.

### **3. Оценка обоснованности и достоверности научных положений, выводов и заключений**

Работа выполнена на базе теории шлифования материалов, основ проектирования абразивного инструмента с привлечением теории прочности хрупких тел, прочности вращающихся объектов, метода конечных элементов, теории вибрационного сепарирования частиц, методов математического моделирования, статистической обработки и корреляционно-регрессионного анализа результатов испытаний с широким использованием ЭВМ, на основе прикладных программ «Excel» и «Statistica», графических редакторов «Компас» и «Paint», программного комплекса «SolidWorks», а также специально разработанного и запатентованного программного продукта в составе 9 программ для ЭВМ. Достоверность полученных результатов обеспечивается сходимостью данных проведения дублирующих экспериментов, итогами лабораторных и производственных испытаний и внедрением созданных разработок на ряде промышленных предприятий. Адекватность разработанных математических моделей подтверждается их проверкой по коэффициенту корреляции, критерию Фишера и другим оценочным критериям. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием современных контрольно-измерительных средств и приборов в лабораториях технических университетов и в производственных условиях машиностроительных и инструментальных заводов в России и за рубежом.

### **4. Ценность для науки и практики**

В диссертационной работе на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение производительности шлифования, стойкости абразивных инструментов и качества обрабатываемых поверхностей, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие отечественного машиностроения. Указанная проблема

решена посредством разработки и создания абразивного инструмента с заданной формой и ориентацией зёрен.

Разработана методология создания абразивных инструментов с заданной формой и ориентацией зёрен, базирующаяся на учёте влияния и научно обоснованном выборе этих параметров, позволяющая упорядочивать внутреннее строение таких инструментов и управлять геометрией их зёрен, что обеспечивает повышение эксплуатационных возможностей инструментов и повышение эффективности операций шлифования по сравнению с использованием стандартного абразивного инструмента с неупорядоченной формой и ориентацией зёрен:

- повышение производительности шлифования в 1,2–1,3 раза;
- повышение стойкости абразивных инструментов в 1,2–1,4 раза;
- повышение прочности и рабочей скорости АИ в 1,1–1,2 раза;
- снижение шероховатости обрабатываемых поверхностей в 1,1–1,4 раза;
- уменьшение глубины зоны термического влияния в 1,3–1,4 раза.

Для получения зёрен с заданной формой выбран метод вибрационной сепарации абразива, а для ориентации зёрен в теле твердотельных инструментов разработан способ, в основу которого положено воздействие электростатического эффекта (Пат. РФ №2369474).

Разработан способ и программное обеспечение (ПрЭВМ №2006613051) для количественной идентификации формы зёрен в трёхмерном пространстве через коэффициент формы (Кф), равный отношению диаметров описанных и вписанных в контур зерна сфер. Для оценки ориентации зёрен в теле инструмента введён параметр «угол ориентации зёрен  $\Theta$ », измеряемый между наибольшей осью зерна и плоскостью резания.

Разработаны способы и программное обеспечение по установлению взаимосвязи формы зёрен с площадью их поверхности и количеством в единице объема (ПрЭВМ №2007612468), посредством которых установлено, что с увеличением Кф зёрен возрастает площадь их поверхности и количество зёрен в единице насыпного объёма и объёма инструмента.

Разработан способ и программное обеспечение по установлению передних углов зёрен в зависимости от их формы (ПрЭВМ №2008614244), с помощью которых установлено, что с увеличением  $K_f$  произвольно ориентированных зёрен их передние углы увеличиваются.

Разработаны способы и программный комплекс в составе четырёх программ для ЭВМ для оценки передних углов зёрен и напряжений в них в зависимости от формы и ориентации в инструменте (ПрЭВМ №2011614263, №2011615114, №2011616506, №2015619877), которые позволили установить характер совместного влияния формы и ориентации зёрен на передние углы и напряжения в них при работе. Дано математическое описание этого влияния посредством тригонометрических рядов с периодом  $\pi$ .

На основе разработанного способа и сконструированной установки для оценки прочности свободных зёрен различных марок и зернистостей в зависимости от формы и ориентации, установлено, что наибольшую прочность имеют зёрна с малыми коэффициентами формы, тангенциально ориентированные зёрна и зёрна, расположенные соосно с вектором действующей нагрузки. Чем больше угол рассогласования между наибольшей осью зерна и воздействующей силой, тем меньше его прочность. Разница в прочности зёрен с различной ориентацией тем более заметна, чем больший  $K_f$  они имеют.

Разработан способ и программное обеспечение для оценки взаимосвязи износа зёрен с их формой и ориентацией в инструменте (ПрЭВМ №2008610817). Установлено, что стойкость зёрен уменьшается с ростом коэффициента формы при всех углах ориентации. Наибольшей стойкостью обладают тангенциально ориентированные зёрна. Стойкости радиально ориентированных зёрен и зёрен, ориентированных вершинами навстречу силе резания, меньше и имеют близкие значения. Наименьшую стойкость имеют зёрна, ориентированные по направлению действия составляющей силы резания  $P_z$ .

Разработаны способы и технологическая оснастка для изготовления шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен (патенты РФ №2349446, №2369474), а также сконструированы стенды, установки и приспособления для проведения комплексных испытаний новых конструкций кругов на прочность, режущую способность, износ, мощность резания.

С помощью специально разработанной методики и программного обеспечения (ПрЭВМ №2017663831) исследована эффективность ориентации зёрен в опытных шлифовальных кругах. Установлено, что порядка 60% зёрен сориентированы с отклонением от заданного направления ориентации не более  $15^\circ$ .

Проведённые динамические и статические испытания изготовленных шлифовальных кругов с заданной формой (в т.ч. согласно разработанного статического способа Пат. РФ №2292032), показали, что увеличивая Кф зёрен в кругах на бакелитовой связке в целом, или локально, в зоне посадочного отверстия (Пат. РФ №2349446), можно повысить их прочность и, как следствие, допустимую скорость шлифования (в 1,15 – 1,3 раза), что повышает режущую способность (до 1,3 раз) и коэффициент шлифования (до 1,1 раза) таких инструментов и снижает температуру при резании и глубину зоны термического влияния (до 1,3 раз) и энергозатраты на обработку.

По результатам исследований и испытаний шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен также установлено, что для обеспечения высокой стойкости шлифовальных кругов и низкой шероховатости обрабатываемых поверхностей целесообразно использовать в режущей части инструментов изометрические зёрна с минимальными значениями Кф и ориентировать их в тангенциальном направлении ( $\Theta=0^\circ$ ). Применение в шлифовальных кругах зёрен изометрической формы повышает стойкости инструмента в 1,3–1,4 раза и снижает шероховатость обрабатываемых поверхностей в 1,3–1,4 раза. Тангенциальное ориентирование зёрен в шлифовальных кругах обеспечивает повышение

стойкости инструмента в 1,2–1,3 раза и снижение шероховатости обрабатываемых поверхностей в 1,1–1,4 раза. Для обеспечения повышенной режущей способности шлифовальных кругов, снижения температуры шлифования и глубины зоны термического влияния при обработке, снижения энергозатрат целесообразно использовать в режущей части инструментов зёрна игольчато-пластинчатой формы с максимальными значениями  $K_f$  и ориентировать их в радиальном направлении ( $\Theta=90^\circ$ ). Применение в шлифовальных кругах зёрен игольчато-пластинчатой формы приводит к повышению режущей способности инструмента до 1,2 раза, к снижению температуры в зоне резания на 20–30  $^\circ\text{C}$  и снижению энергозатрат на обработку в 1,1 раза. Радиальное ориентирование зёрен в шлифовальных кругах обеспечивает повышение режущей способности инструмента до 1,2 раза, снижение температуры в зоне резания на 20–70  $^\circ\text{C}$  и снижение глубины зоны термического влияния до 1,4 раза. Указанные эффекты могут быть усилены за счет совместного упорядочения формы и ориентации зёрен в инструментах и применения других вариантов ориентирования зёрен. Использование для изготовления кругов зёрен с большими  $K_f$ , и зёрен, ориентированных в радиальном ( $\Theta=90^\circ$ ) или близком к нему направлениях ( $\Theta=22,5^\circ\div 90^\circ$ ), обеспечивает максимальные значения передних углов у зёрен, что позволяет значительно повысить режущую способность инструментов, уменьшить деформации металла, снизить температуру шлифования и устранить или уменьшить риск появления прижогов на обрабатываемых деталях. Ориентация зёрен соосно направлению действия силы резания позволяет изготавливать шлифовальные инструменты одновременно с высокой режущей способностью и стойкостью, для чего для достижения максимального эффекта целесообразно предварительно определить угол действия силы резания и обеспечить соответствующий угол ориентации зёрен в инструменте.

Исходя из того, что соотношение составляющих силы резания  $P_y$  и  $P_z$  для различных операций шлифования, как правило, варьируется в интервале

от 1,2:1 до 10:1, то рациональные углы ориентации зёрен соосно силе резания находятся в диапазоне  $\Theta = 50 \div 84^\circ$ . При отрезном шлифовании заготовок из стали 10 рациональный угол ориентации зёрен в кругах соосно силе резания составляет в среднем  $\Theta = 75^\circ$ , а при шлифовании заготовок из стали 12X18H10T и ШХ15 (60 HRC) составляет  $\Theta = 78^\circ$ .

В работе показано, что для новых конструкций кругов целесообразно расширить их характеристику, введя дополнительно коэффициент формы зёрен [Кф] и угол их ориентации [ $\Theta$ ], а на самих кругах следует указывать (стрелкой) рекомендуемое направление вращения для обеспечения наклона зёрен навстречу силе резания.

По результатам исследований геометрических, прочностных и стойкостных показателей зёрен, а также комплексных испытаний шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен получены математические модели, отражающие наблюдаемые явления и позволяющие на этапе проектирования инструментов прогнозировать и обеспечивать рациональное сочетание их эксплуатационных показателей под конкретные условия и задачи обработки за счёт управления формой и ориентации зёрен. Разработаны рекомендации по повышению эффективности различных операций шлифования за счёт управления геометрией зёрен.

Шлифовальные круги с заданной формой и ориентацией зёрен испытаны в лабораторных и производственных условиях, результаты которых подтвердили повышенные эксплуатационные характеристики по сравнению со стандартными инструментами. Новые шлифовальные круги и другие технические решения испытаны и внедрены на ряде промышленных предприятий: ООО ИК «Спецкомплектация» (г. Кемерово), ООО «Завод электротехнической аппаратуры» (г. Кемерово), ООО «Восток-ПолимерХим» (г. Кемерово), авторемонтных мастерских компании «Кузбассразрезуголь» (г. Белово), ООО «Агромаш» (г. Кемерово). Технологии их изготовления готовы к широкому промышленному применению.

## **5. Замечания по диссертационной работе.**

1. Из автореферата не ясно, насколько производительным является метод вибрационной сепарации зерен для того, чтобы обеспечить серийный способ производства шлифовальных кругов новых конструкций.

2. При моделировании зависимости средних значений коэффициентов развитости, длины контуров зёрен, количества зёрен в насыпном объеме, передних углов зерен от коэффициентов формы не учтены дисперсии значений этих параметров во фракциях.

3. Имеет ли влияние марка и зернистость абразивного материала на эффективность и производительность вибрационной сортировки шлифовальных зерен?

4. Будет ли эффект улучшения эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов, если в качестве исходных зерен использовать зерна алмаза или других СТМ?

5. Не отражено, как устранялось радиальное биение у моделей шлифовальных кругов с однорядным расположением зёрен на основе эпоксидной смолы при их испытаниях шлифованием.

Сделанные замечания не снижают важности и ценности полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

**6. Заключительная оценка соответствия диссертационной работы В.А. Короткова требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней».**

Основные положения работы доложены на 20-ти международных и 25-и всероссийских конференциях. По материалам диссертации опубликованы 90 научных работ (в том числе 22 статьи – в журналах, входящих в перечень ВАК, 2 из которых также проиндексированы в ядре Web of Science, 9 публикаций – на английском языке в изданиях Scopus и Web of Science, 2 монографии, получено 3 патента РФ на изобретения и 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

В отношении публикаций диссертационная работа соответствует требованиям п. 9, п. 11 «Положения о порядке присуждения ученых

степеней».

Язык работы грамотный, изложение логично, разделы взаимосвязаны. Работа хорошо иллюстрирована и оформлена. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

В диссертационной работе содержатся научные положения, выдвинутые автором, даны научно обоснованные решения.

В целом, диссертация Короткова Виталия Александровича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задач, имеющих существенное значение для современного машиностроения, т.е. соответствует п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней».

На основании вышеизложенного считаю, что рецензируемая диссертационная работа Короткова Виталия Александровича имеет высокую актуальность, научную новизну и практическую значимость, обладает широкой географией мест апробации, включая заграничные ВУЗы и предприятия, имеет всестороннее опубликование, высокую степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, достоверность и новизну, а также внедрение на производстве.

Работа соответствует требованиям ВАК «Положение о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук, а ее автор Коротков Виталий Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Официальный оппонент:

Зав. кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств» Волжского политехнического института (филиала) ФГБОУ ВО «Волгоградского государственного технического университета», доктор технических наук, профессор

