

ГЕОМЕТРИЯ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ЗЕРЕН С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ФОРМОЙ

*В.А. КОРОТКОВ, канд. техн. наук, доцент
Е.М. МИНКИН, инженер,
ФГБОУ ВПО КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева
(г. Кемерово)*

Поступила 10 января 2014
Рецензирование 30 апреля 2014
Принята к печати 17 мая 2014

Коротков В.А. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
e-mail: korotkov-va@mail.ru

Эффективность процесса шлифования во многом определяется свойствами абразивных зерен, в том числе их формой и ориентацией в теле шлифовальных инструментов. Повысить эксплуатационные показатели шлифовальных инструментов можно упорядочением геометрии зерен, т.е. подбором рациональной формы и ориентации зерен для конкретных условий обработки и параметров силового нагружения. Для решения такой проблемы предлагается разработанная и опробованная на практике методика исследования для оценки взаимосвязи величин передних углов шлифовальных зерен и напряжений в них при варьировании разновидностей их формы и пространственной ориентации в теле инструмента. В ходе разработки методики исследована взаимосвязь передних углов шлифовальных зерен нормального электрокорунда с факторами формы, ориентации и износа. Установлено, что минимальные значения передних углов фиксируются у зерен изометрической формы и тангенциально ориентированных зерен, а максимальные значения – у игольчато-пластинчатых зерен, ориентированных под углами $\Theta = 22,5...45^\circ$ к плоскости резания. Произведен также анализ напряжений в ориентированных шлифовальных зернах нормального электрокорунда различных форм при работе отрезных шлифовальных кругов.

Установлено, что для отрезных кругов рациональный угол ориентации зерен составляет $\Theta = 67^\circ 30'$. Осуществлена практическая проверка разработанной методики исследований путем проведения экспериментов по установлению пределов прочности ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формой различных марок и зернистостей при одноосном сжатии.

Ключевые слова: шлифование, шлифовальные инструменты, отрезные шлифовальные круги, шлифовальные зерна, передний угол, коэффициент формы зерен, угол ориентации, износ зерен, напряжения в шлифовальных зернах, прочность зерен.

Введение

Эксплуатационные показатели шлифовальных инструментов, такие как режущая способность, коэффициент шлифования, эффективная мощность резания, температура резания и другие, зависят от множества факторов, в числе которых: физико-механические свойства абра-

зивных материалов, зернистость, тип связки, твердость, номер структуры, характер воздействия силовой нагрузки, схема шлифования и форма инструментов.

При прочих равных условиях эффективность процесса шлифования во многом определяется свойствами зерен, в частности, их прочностью и абразивной способностью, которые, в свою

очередь, задаются химическим составом и геометрией зерен. Химический состав абразивного материала формируется в соответствии со сложившейся практикой применения абразивов различных марок для обработки тех или иных материалов. Геометрия зерен зависит от их формы, пространственной ориентации в теле инструментов, а также от характера износа и оказывает непосредственное влияние на передние углы зерен и их прочность.

При изготовлении шлифовальных зерен по наиболее распространенной технологии, состоящей в дроблении слитков абразивного материала с последующим рассевом на ситах, зерна получают произвольную форму. Для идентификации формы зерен используют качественную и количественную классификацию. Качественная классификация основана на описании формы зерен следующими общепринятыми терминами: зерна изометрические, осколочные, промежуточные, пластинчатые, мечевидные, иглообразные, игольчато-пластинчатые [1–4]. Количественная оценка формы зерен основана на сравнении их проекций с плоскими либо объемными фигурами. Так, например, для оценки формы абразивных зерен может быть использовано соотношение сторон параллелепипеда, описанного вокруг объемной проекции зерна [1, 2], а для алмазных зерен – соотношение осей описанного эллипса [5]. Также форма абразивных зерен может быть количественно оценена коэффициентом формы (K_{ϕ}), равным отношению диаметров описанных $D_{\text{оп}}$ к диаметрам вписанных окружностей $D_{\text{вп}}$ в плоскую проекцию зерен [4]. Форма алмазных зерен, согласно ГОСТ 9206–80, оценивается с помощью коэффициента формы K_{ϕ} , равного отношению длины плоской проекции зерна l к ее ширине b , при этом изометрическими считаются зерна, коэффициент формы которых $K_{\phi} \leq 1,3$. Коэффициент формы зерен во фракции определяется как среднее арифметическое по результатам оценки формы не менее 50 зерен.

Форма абразивных зерен непосредственно влияет на их геометрию, в частности, на величины их передних углов [4, 6, 7] и на эксплуатационные показатели шлифовальных инструментов [8, 9, 10]. Шлифовальные зерна требуемой формы могут быть получены путем применения специальных технологий их изготовления (регулированием скорости кристаллизации расплава

абразива, различными способами дробления, применением технологий изготовления формокорундов и сферокорундов и др.) [11], а также посредством сепарации из исходной массы обычного абразива [9, 10, 12].

Пространственная ориентация абразивных зерен в теле инструментов также существенно влияет на геометрию зерен и эффективность процесса шлифования [10, 13]. Ориентация зерен при изготовлении шлифовальных инструментов может быть реализована различными способами. Например, известен способ изготовления твердотельных шлифовальных инструментов, при котором металлизированные шлифовальные зерна ориентируют воздействием электромагнитного поля в сочетании с ультразвуковыми колебаниями [14]. Известен также способ изготовления шлифовальных инструментов, при котором обычные неметаллизированные шлифовальные зерна, предварительно покрытые пленкой клея, помещают в ферромагнитную жидкость и ориентируют электромагнитным полем, клеевое покрытие полимеризуется, после чего ферромагнитную жидкость удаляют [15]. Известен и широко распространен способ изготовления шлифовальных шкур и лент, при котором абразивные зерна ориентируют электростатическим полем [16].

Разработан и опробован на практике способ изготовления твердотельных шлифовальных инструментов на основных типах связующих (бакелитовой, керамической, вулканической и других связках), при котором зерна ориентируют воздействием электростатического поля [10, 17].

Таким образом, существует широкий набор способов целенаправленного регулирования геометрии режущих микроклиньев шлифовальных инструментов. Вместе с тем имеющиеся возможности по обеспечению рациональной геометрии зерен используются лишь частично. Одна из основных причин этого состоит в том, что практически во всех предшествующих исследованиях факторы формы и ориентации зерен рассматривались и подбирались отдельно, без учета друг друга. В частности, рациональная форма зерен подбиралась под конкретные условия обработки для повышения определенных эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов, например, режущей способности, качества обработанных поверхностей, сни-

жения износа инструментов и др. [1, 4, 5, 8, 9, 10, 13]. Кроме того, ориентация зерен, как правило, осуществлялась по двум характерным направлениям. Зерна ориентировали радиально, когда их главные (т. е. наибольшие) оси перпендикулярны плоскости резания ($\Theta = 90^\circ$) и в тангенциальном направлении, когда главные оси зерен параллельны плоскости резания ($\Theta = 0^\circ$) [10, 16]. Вместе с тем номенклатура шлифовальных инструментов и схемы их силового нагружения в процессе работы весьма разнообразны, и ориентирование зерен следует осуществлять под углами, наиболее эффективными для конкретного случая шлифования. Рациональные углы ориентации зерен могут существенно отличаться от вариантов их радиального или тангенциального расположения. Современные способы изготовления шлифовальных инструментов позволяют обеспечить любые требуемые направления ориентирования зерен [10, 13, 17]. Основные же перспективы упорядочения геометрии зерен и повышения эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов открываются в совместном использовании и целенаправленном регулировании факторов формы и ориентации зерен.

Совместный подбор рациональной формы и ориентации зерен экспериментальным путем является весьма трудоемким, сложным и затратным по времени. Так, например, сравнение шлифовальных инструментов с четырьмя различными коэффициентами формы зерен и четырьмя направлениями их ориентации потребует изготовления шестнадцати разновидностей инструментов. Для получения адекватных сравнительных данных следует изготовить минимум по три инструмента каждой разновидности и испытать каждый инструмент. При этом использование матрицы испытаний 4×4 может оказаться недостаточным для нахождения рационального коэффициента формы и угла ориентации зерен.

В связи с вышеизложенным для создания шлифовальных инструментов с рациональной геометрией зерен целесообразно иметь разработанную методику, позволяющую предвидеть и анализировать эксплуатационные показатели инструментов на этапе их проектирования. Такая методика должна обеспечивать установление взаимосвязи величин передних углов ориентированных шлифовальных зерен с раз-

новидностями их формы с учетом фактора износа, а также анализировать напряжения в ориентированных зернах с контролируемой формой. Представленная работа посвящена разработке указанной методики и экспериментальной проверке достоверности получаемых с ее помощью результатов.

Методика исследований взаимосвязи величин передних углов шлифовальных зерен и напряжений в них при работе с параметрами их формы и ориентации в теле инструмента

При проектировании шлифовальных инструментов с упорядоченной формой и ориентацией зерен на первом этапе производится анализ геометрии зерен в исходном (базовом) шлифовальном инструменте, взятом за основу. Для этого необходимо получить изображения не менее 50...100 зерен из фракции абразива, использованной для изготовления данного шлифовального инструмента. Изображения зерен можно получать путем сканирования либо фотографирования с увеличением и разрешением, достаточным для четкой фиксации контуров поверхности зерен. Далее производится количественная оценка формы у изображений зерен и для каждого исследуемого зерна устанавливается коэффициент формы K_f , что возможно осуществить вручную либо с привлечением специально разработанного программного обеспечения [18].

После этого производятся измерения передних углов на исследуемых изображениях шлифовальных зерен при варианте их гипотетической радиальной ориентации относительно плоскости резания ($\Theta = 90^\circ$). На основе получаемых данных строятся геометрические модели шлифовальных зерен с различными коэффициентами формы, варьирующимися от минимального до максимального значений в исследуемой фракции абразива. Общее число построенных моделей зерен должно быть не менее 4–5, в том числе модель зерна со средним коэффициентом формы зерен в исследуемой фракции. Указанные операции целесообразно выполнять с помощью специально разработанных программ для ЭВМ [19, 20, 21], которые позволяют поворачивать изображения зерен под требуемым углом относительно плоскости резания, определять

передние углы во всех точках контура зерен и получать исходные данные для построения их геометрических моделей. Непосредственное построение геометрических моделей зерен можно осуществлять в любом графическом редакторе, например, «Компас», «AutoCAD» и другие, которые обеспечивают преобразование получаемых изображений в формат bmp.

Полученные изображения моделей зерен посредством упомянутых выше программ для ЭВМ поворачиваются под различными углами относительно плоскости резания, и для каждого варианта их ориентации определяются величины передних углов. Получаемые результаты позволяют построить двухфакторные графики зависимости передних углов шлифовальных зерен в исследуемой фракции от коэффициента их формы K_f и угла ориентации Θ .

Анализ получаемых зависимостей позволяет спрогнозировать ряд эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов. Так, известно, что величины передних углов шлифовальных зерен напрямую влияют на режущую способность инструментов, температуру в зоне резания, деформации обрабатываемого материала, шероховатость и другие показатели качества обрабатываемых поверхностей [1–5, 8, 9, 10, 13, 16].

Для прогнозирования уровня износа проектируемого шлифовального инструмента целесообразно оценить величины напряжений в шлифовальных зернах в зависимости от их формы и пространственного расположения в теле инструмента. С этой целью необходимо установить характер и величины силовой нагрузки, действующей на базовый шлифовальный инструмент в процессе эксплуатации, а именно требуется измерить составляющие силы резания, определить количество зерен, одновременно участвующих в работе, и рассчитать величины нагрузок, действующих на единичные зерна.

Измерение составляющих силы резания производится либо напрямую с помощью динамометров, либо косвенно, например, через эффективную мощность резания. Для подсчета количества зерен на единице площади рабочей поверхности круга необходимо получить ее увеличенное изображение при помощи микроскопа или современного цифрового фотоаппарата с режимом макросъемки. Число зерен, одновременно участвующих в работе, определяется через

известную площадь пятна контакта шлифовального инструмента с обрабатываемой заготовкой.

Картина распределения напряжений в ориентированных шлифовальных зернах с контролируемой формой может быть получена при помощи различных программных комплексов для прочностных расчетов, например, «SolidWorks», «Ansis» и др. Для этого в выбранном программном комплексе к полученным ранее моделям зерен с различными коэффициентами формы и при различных вариантах их ориентации прикладываются составляющие силы резания, воздействующие на единичное зерно при работе. Получаемые результаты позволяют построить двухфакторные графики зависимости напряжений в шлифовальных зернах от коэффициента их формы K_f и угла ориентации Θ .

Совместный анализ графиков зависимостей передних углов и напряжений у шлифовальных зерен от коэффициента их формы угла ориентации относительно плоскости резания позволяет выбрать оптимальное сочетание количественных показателей формы и пространственного расположения зерен для достижения требуемого сочетания эксплуатационных показателей в проектируемом шлифовальном инструменте.

Исследование взаимосвязи величин передних углов шлифовальных зерен с параметрами их формы и ориентации в теле инструмента

Практическая отработка описанной выше методики исследований осуществлялась на примере шлифовальных зерен, использованных для изготовления опытных отрезных шлифовальных кругов с контролируемой ориентацией зерен и характеристикой 230×4×22 13A40H T2 БУ 80 м/с [10]. Указанные шлифовальные инструменты были изготовлены в соответствии с разработанным и запатентованным способом [17] без применения описанной методики. Результаты их испытаний послужили отправной точкой для установления взаимосвязи величин передних углов ориентированных шлифовальных зерен с разновидностями их формы, а также использованы для сравнения с результатами анализа напряжений в ориентированных зернах с контролируемой формой.

При проектировании и изготовлении отрезных кругов форма шлифовальных зерен коли-

чественно оценивалась в трехмерном пространстве с помощью специально разработанного алгоритма и программы для ЭВМ [10, 18]. Коэффициент формы K_ϕ в данном случае был равен отношению диаметров, описанных вокруг контуров зерен сфер $D_{оп}$, к диаметрам вписанных в них сфер $D_{вп}$.

Для оценки величин передних углов ориентированных шлифовальных зерен разработан программный комплекс, позволяющий поворачивать их изображения, полученные с помощью микроскопа и цифрового фотоаппарата, под требуемым углом относительно плоскости резания и определять передний угол во всех точках контура [19, 20, 21].

С целью сокращения времени и трудоемкости оценки передних углов шлифовальных зерен при различных углах их ориентации разработана и реализована методика, основанная на построении в графическом редакторе «Компас» моделей шлифовальных зерен с различными коэффициентами формы и определении величин средних передних углов зерен при их различной ориентации и степени износа. Исходными данными для построения моделей зерен с различными коэффициентами формы послужили результаты оценки передних углов радиально ориентированных зерен марки 13A40H.

В процессе проведения исследований для каждой модели зерна с определенным коэффициентом формы формировалась матрица значений передних углов для различных вариантов их ориентации и с учетом фактора износа. Полученные результаты сводились в таблицы формата Excel с последующим построением трехмерных графиков зависимости передних углов шлифовальных зерен от коэффициента их формы K_ϕ и угла пространственной ориентации Θ , измеряемого между главной (т. е. наибольшей) осью зерна L и плоскостью резания.

Результаты исследования взаимосвязи величин передних углов шлифовальных зерен с параметрами их формы и ориентации

Результаты оценки передних углов ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формой марки 13A40H представлены на рис. 1. Полученные данные говорят о том, что

независимо от коэффициента формы, чем длиннее шлифовальное зерно работает, т.е. изнашивается вдоль главной оси и находится в теле инструмента, тем больше (в среднем) становится его передний угол. При этом фактор ориентации зерен относительно плоскости резания весьма существенно влияет на величины передних углов.

Так, например, при $K_\phi = 1,6$ передние углы шлифовальных зерен могут варьироваться в пределах $-60...-6^\circ$ (износ до $1/3L$) и $-44...+9^\circ$

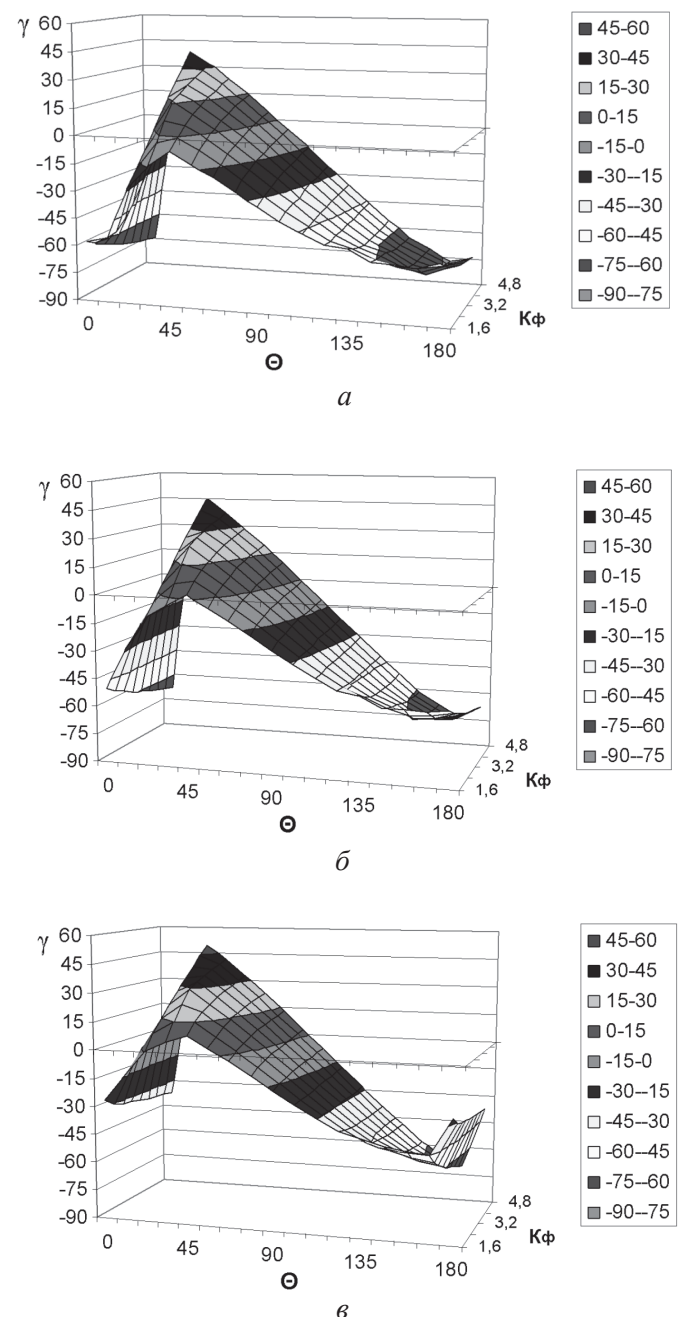


Рис. 1. Влияние коэффициента формы K_ϕ и угла пространственной ориентации Θ зерен 13A40H при их гипотетическом износе до $1/3L$ (а), до $1/2L$ (б) и до $2/3L$ (в) на величины передних углов γ

(износ до $2/3L$). При $K_\phi = 4,8$ передние углы зерен в зависимости от угла ориентации Θ изменяются в диапазоне $-77...+39^\circ$ (износ до $1/3L$) и $-69...+42^\circ$ (износ до $2/3L$).

Таким образом, одно и то же зерно, по-разному ориентированное относительно плоскости резания, имеет значительную разницу величин передних углов. Она достигает $53...54^\circ$ у изометрических зерен ($K_\phi = 1,6$) и $111...116^\circ$ у игольчато-пластинчатых зерен ($K_\phi = 4,8$), что существенно больше диапазона изменения передних углов лезвийных инструментов, применяемых для обработки сталей и сплавов. Кроме того, полученные данные показывают, что передние углы шлифовальных зерен достигают максимальных положительных значений при углах ориентации $\Theta = 22,5...45^\circ$.

Результаты оценки передних углов шлифовальных зерен (рис. 1) коррелируют с результатами экспериментов по установлению режущей способности отрезных кругов с ориентированными зернами [10], где сравнивались отрезные круги с тангенциальной ориентацией зерен ($\Theta = 0^\circ$), круги с неориентированными зернами ($\Theta = \text{var}$) и круги с радиальной ориентацией зерен ($\Theta = 90^\circ$). Наименьшей режущей способностью и минимальными значениями передних углов характеризуются отрезные круги с тангенциальной ориентацией зерен ($\Theta = 0^\circ$). Далее по возрастанию следуют обычные отрезные круги с неориентированными зернами ($\Theta = \text{var}$). Максимальной режущей способностью и максимальными величинами передних углов среди сравниваемых разновидностей инструментов отличаются круги с радиальной ориентацией зерен ($\Theta = 90^\circ$).

Результаты оценки передних углов шлифовальных зерен (см. рис. 1) также коррелируют с результатами испытаний отрезных кругов с контролируемой формой зерен [10]. Из графиков (см. рис. 1) следует, что у неориентированных шлифовальных зерен (с произвольными углами их ориентации) с увеличением коэффициента формы происходит рост величин передних углов. В соответствии с этим с увеличением коэффициента формы зерен зафиксирован существенный рост режущей способности отрезных кругов, снижение температуры в зоне резания и деформаций обрабатываемого материала.

Анализ результатов оценки передних углов шлифовальных зерен (см. рис. 1) и результатов

испытаний отрезных кругов с заданной ориентацией и контролируемой формой зерен [10] показывает, что для достижения максимальной режущей способности шлифовальных инструментов и соответственно снижения деформаций обрабатываемого материала и температуры резания необходимо применять зерна игольчато-пластинчатой формы (с максимальными значениями K_ϕ) и располагать их в инструментах под углами ориентации $\Theta = 22,5...45^\circ$.

Исследование взаимосвязи величин напряжений в шлифовальных зернах с параметрами их формы и ориентации в теле инструмента

Для исследования напряжений, возникающих в шлифовальных зернах при различных вариантах их ориентации в теле инструмента, предварительно определялись составляющие силы резания, действующие на зерна марки 13A40H при работе отрезных шлифовальных кругов с характеристикой $230 \times 4 \times 22$ 13A40H T2 БУ 80 м/с [10]. С этой целью был рассмотрен случай разрезки заготовок из стали 10 (трубы $21,3 \times 2,8$) на скорости $V = 80$ м/с с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу $F = 32$ Н ($P_y = 32$ Н). В процессе разрезки заготовок среди прочих показателей определялась эффективная мощность резания, что позволило вычислить тангенциальную составляющую силы резания ($P_z = 8,46$ Н).

Для анализа напряжений в зернах цифровым фотоаппаратом в режиме макросъемки фотографировались участки рабочей поверхности отрезных кругов и производился подсчет количества зерен на единице площади поверхности в графическом редакторе Paint. Установлено, что на рабочей поверхности исследуемых отрезных кругов число зерен в среднем составляет $N_s = 2,68$ зерен/мм². Исходя из этой величины, а также из площади контакта отрезного круга с разрезаемой заготовкой ($S = 22,4$ мм²), определено количество шлифовальных зерен, одновременно участвующих в работе ($N_s = 60$ зерен), и установлены величины сил, действующих на единичное шлифовальное зерно на поверхности круга ($P_y = 0,533$ Н; $P_z = 0,141$ Н).

Полученные данные позволили произвести расчет напряжений, возникающих в моделях шлифовальных зерен марки 13A40H с различ-

ными коэффициентами формы и вариантами ориентации в теле инструмента в программном комплексе SolidWorks. Программными настройками при проведении расчетов послужили следующие данные: линейная упругая изотропная модель; материал – нормальный электрокорунд; предел прочности при растяжении $8,5 \cdot 10^7$ Н/м²; предел прочности при сжатии $7,6 \cdot 10^8$ Н/м²; модуль упругости $3,74 \cdot 10^{11}$ Н/м²; коэффициент Пуассона 0,22; массовая плотность 4025 кг/м³; модуль сдвига $1,5 \cdot 10^{11}$ Н/м²; коэффициент теплового расширения $8 \cdot 10^{-6}$ 1/К. Тип сетки: сетка на твердом теле на основе кривизны; четыре точки Якобиана; максимальный размер элемента 0,00 968 809 мм; минимальный размер элемента 0,00 322 933 мм.

Для определения объемной прочности зерен проведены исследования по оценке напряженного состояния на границе их заделки в связку. На основе данных по оценке величин передних углов радиально ориентированных зерен марки 13A40H, полученных с помощью программного комплекса [19, 20, 21], построены модели зерен с различными коэффициентами формы. К полученным моделям шлифовальных зерен 13A40H (рис. 2) имитировалось приложение сил, действующих на реальное единичное шлифовальное зерно ($P_y = 0,533$ Н; $P_z = 0,141$ Н), при различных вариантах их ориентации и заделки в связку. При этом установлено, что в зависимости от конкретного варианта ориентации максимальные напряжения возникают на различных участках модели зерна по границе заделки в связку.

Для более полного представления о напряженном состоянии модели шлифовального зерна при всех вариантах ее ориентации снимались и анализировались данные в трех характерных зонах по границе заделки в связку: слева, по центру и справа (рис. 2, б).

Результаты оценки напряжений в модели шлифовального зерна с $K_\phi = 2,4$ (средний коэффициент формы зерен в исследуемой фракции) при различных углах ориентации представлены на рис. 3.

Данные графика (рис. 3) показывают, что наименьшие напряжения возникают при тангенциальной ориентации модели зерна. Далее в диапазоне от $\Theta = 11^\circ 15'$ до $\Theta = 45^\circ$ происходит существенный рост напряжений, при этом максимальные значения достигаются в «зоне

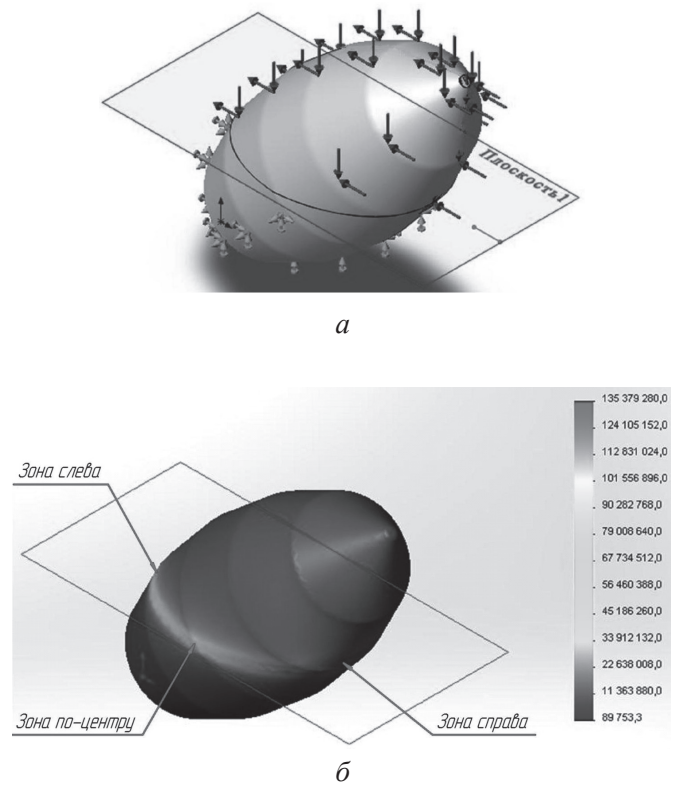


Рис. 2. Схема нагружения (а) и картина напряжений по границе заделки в связку (б) в модели зерна 13A40H с $K_\phi = 2,4$ и углом ориентации $\Theta = 45^\circ$, до $1/2L$, закрепленной в связке

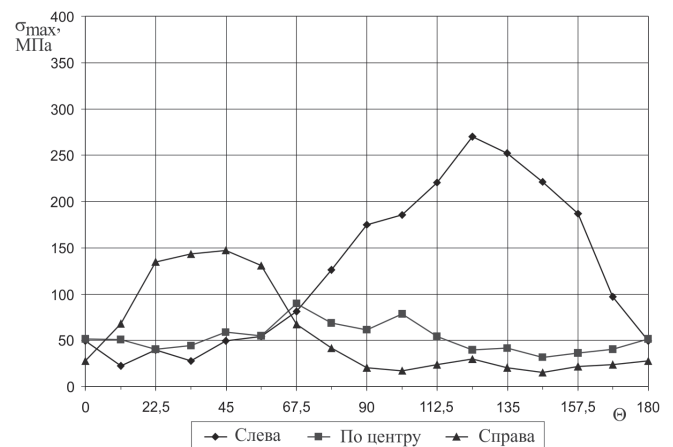


Рис. 3. Напряжения в модели шлифовального зерна 13A40H, закрепленной до $1/2L$, с $K_\phi = 2,4$ по границе заделки в связку при различных углах ориентации

справа» под свесом выступающей части зерна. В следующем диапазоне от $\Theta = 45^\circ$ до $\Theta = 67^\circ 30'$ происходит снижение максимальных напряжений до значений, приближенных к варианту тангенциальной ориентации. При этом очевидно, что снижение максимальных напряжений при $\Theta = 67^\circ 30'$ происходит в результате равномерного распределения напряжений в объеме зерна (слева, по центру и справа) по границе заделки

в связку. В свою очередь, такое распределение напряжений достигается за счет того, что угол ориентации зерна $\Theta = 67^\circ 30'$ близок к направлению вектора силы резания P . Здесь составляющие силы резания $P_y = 0,533$ Н, $P_z = 0,141$ Н, т. е. имеют соотношение 3,78 : 1, и вектор силы резания P совпадает с продольной осью зерна при его ориентации с $\Theta = 75^\circ 12'$.

Расчет и последующее сравнение напряжений для углов ориентации $\Theta = 67^\circ 30'$ и $\Theta = 75^\circ 12'$ показывают, что более рациональным для снижения максимальных напряжений является угол $\Theta = 67^\circ 30'$.

При дальнейшем увеличении угла ориентации в диапазоне от $\Theta = 67^\circ 30'$ до $\Theta = 123^\circ 45'$ происходит значительный рост напряжений до

наибольших наблюдаемых значений. Максимально нагруженная зона здесь – «зона слева» под свесом выступающей части зерна.

Вместе с тем полученные данные говорят о том, что во всех случаях более рациональным является ориентирование зерна вершиной навстречу направлению действия составляющей силы резания P_z . Это объясняется тем, что при ориентации зерна навстречу P_z вектор силы резания P находится вблизи от главной оси зерна. При ориентации зерна вершиной противоположно направлению P_z сила резания P действует под большими углами по отношению к главной оси зерна, создавая максимальные напряжения в «зоне слева» (рис. 4).

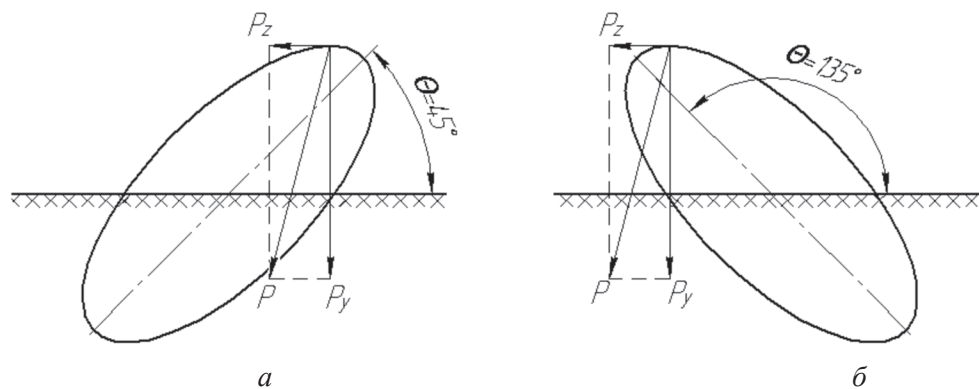


Рис. 4. Направление действия сил резания по отношению к главной оси зерна при его расположении вершиной навстречу силе P_z (а) и вершиной от направления действия силы P_z (б)

Аналогичные по характеру распределения данные (см. рис. 3) получены при исследовании напряжений в моделях зерна при различных вариантах ориентации и закреплении в связке до $2/3L$ и до $1/3L$. В результате обобщения всех полученных данных построен сводный график максимальных напряжений в модели шлифовального зерна 13A40H с $K_\Phi = 2,4$ по границе заделки в связку при различных углах ориентации и глубинах закрепления в связке (рис. 5).

График (см. рис. 5) подтверждает, что, как и предполагалось, чем глубже закреплено зерно в связке, тем меньшие напряжения в нем возникают. При этом разница в значениях напряжений при закреплении зерна в связке до $2/3L$ и до $1/2L$ невелика. Существенный рост напряжений наблюдается при переходе к закреплению зерна в связке до $1/3L$ (выступании из связки на $2/3L$).

Характер изменения напряжений в зависимости от угла ориентации зерна во всех рассматриваемых случаях практически одинаков.

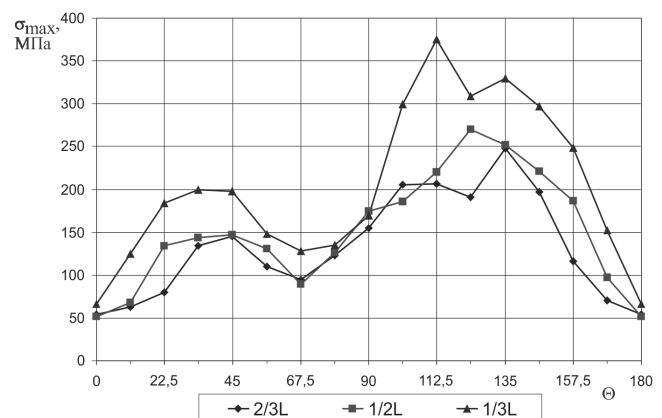


Рис. 5. Максимальные напряжения в модели шлифовального зерна 13A40H с $K_\Phi = 2,4$ по границе заделки в связку при различных углах ориентации и при закреплении в связке до $2/3L$, до $1/2L$ и до $1/3L$

Обобщая все приведенные данные, можно сделать вывод о том, что наименьшие напряжения по границе заделки зерен в связку (см. рис. 5) фиксируются при их тангенциальной ориентации относительно плоскости резания

($\Theta = 0^\circ$). Однако данный вариант ориентации зерен является наименее эффективным с точки зрения обеспечения процесса резания, поскольку передние углы зерен здесь достигают наименьших значений из возможных в рассматриваемом случае ($\gamma = -56^\circ$ при закреплении в связке до $1/2L$), и резание такими зернами весьма затруднено. Наиболее рациональным вариантом ориентации зерен в рассматриваемом случае является $\Theta = 67^\circ 30'$. При данном угле ориентации зерен относительно плоскости резания напряжения на их вершинах и по границе их заделки в связку незначительно отличаются от случая тангенциальной ориентации ($\Theta = 0^\circ$), а передние углы характеризуются рациональными значениями, близкими к нулевым ($\gamma = -3^\circ$).

Таким образом, при $\Theta = 67^\circ 30'$ шлифовальные зерна в отрезных кругах эффективно срезают металл и имеют при этом напряжения, близкие к минимально возможным при отрезном шлифовании.

Основные результаты исследования взаимосвязи величин напряжений в шлифовальных зернах с параметрами их формы и ориентации

Дальнейшие исследования по установлению рациональных углов ориентации зерен для нескольких разновидностей их формы ($K_\phi = 1,6$; $K_\phi = 2,4$; $K_\phi = 3,2$; $K_\phi = 4,0$; $K_\phi = 4,8$) и глубины заделки в связку выявили аналогичный характер распределения напряжений (рис. 6, а, б, в). Приведенные данные (рис. 6) также показывают, что для всех углов ориентации зерен при увеличении их коэффициента формы максимальные напряжения существенно возрастают. Так, при наиболее рациональном угле ориентации $\Theta = 67^\circ 30'$ при переходе от $K_\phi = 1,6$ до $K_\phi = 4,8$ (заделка в связку до $1/2L$) максимальные напряжения возрастают в 4,2 раза (с $\sigma_{\max} = 79,8$ МПа до $\sigma_{\max} = 335,6$ МПа). При наименее рациональном угле ориентации $\Theta = 123^\circ 75'$ при переходе от $K_\phi = 1,6$ до $K_\phi = 4,8$ максимальные напряжения возрастают в 7,7 раза (с $\sigma_{\max} = 187,7$ МПа до $\sigma_{\max} = 1443,9$ МПа).

Выявленные зависимости коррелируют с результатами испытаний по оценке износа отрезных кругов с контролируемой формой и ориентацией зерен [10] и подтверждают их. Так,

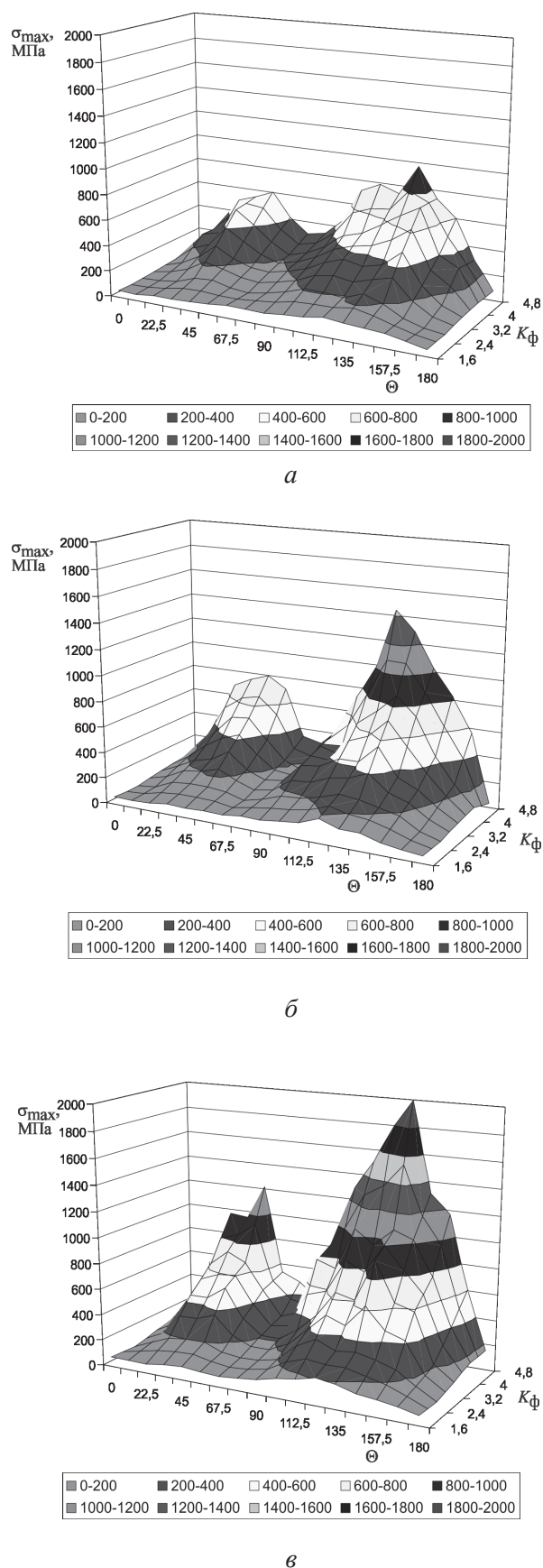


Рис. 6. Зависимости величин максимальных напряжений в моделях зерен 13A40H по границе заделки в связку от угла ориентации Θ и коэффициента формы K_ϕ при закреплении в связку до $2/3L$ (а), до $1/2L$ (б) и до $1/3L$ (в)

результаты оценки износа отрезных кругов с контролируемой формой зерен показывают, что с увеличением коэффициента формы зерен износ кругов существенно возрастает. Сравнение результатов испытаний отрезных кругов с тангенциальной ориентацией зерен ($\Theta = 0^\circ$), кругов с неориентированными зернами ($\Theta = \text{var}$) и с радиальной ориентацией зерен ($\Theta = 90^\circ$) показывает, что наименьшим износом и минимальными величинами напряжений в зернах характеризуются инструменты с тангенциальной их ориентацией ($\Theta = 0^\circ$). Далее по возрастанию следуют обычные отрезные круги с неориентированными зернами ($\Theta = \text{var}$). Максимальный износ и максимальные величины напряжений в зернах сравниваемых отрезных кругов наблюдаются при радиальной ориентации зерен ($\Theta = 90^\circ$).

Анализ результатов оценки напряжений в шлифовальных зернах (см. рис. 6) и результатов испытаний отрезных кругов с заданной ориентацией и контролируемой формой зерен [10] показывает, что для обеспечения максимальной стойкости шлифовальных инструментов целесообразно использовать зерна изометрической формы (с минимальными значениями K_Φ), а также ориентировать шлифовальные зерна в тангенциальном направлении ($\Theta = 0^\circ$). Кроме того, анализ распределения напряжений в ориентированных зернах (см. рис. 6) и величин их передних углов (см. рис. 1) позволяет констатировать, что шлифовальные инструменты с достаточно высокой стойкостью и одновременно повышенной режущей способностью можно изготовить, ориентируя шлифовальные зерна под углами наклона, близкими к направлению вектора силы резания P , действующей на инструмент в процессе эксплуатации. Для отрезных шлифовальных кругов, изготавливаемых из зерен нормальных электрокорундов и используемых для обработки конструкционных сталей, при эксплуатации которых радиальная составляющая силы резания P_y в 3...5 раз превосходит тангенциальную составляющую P_z , может быть рекомендован рациональный угол ориентации зерен порядка $\Theta = 67^\circ 30'$.

Таким образом, представленная методика исследований, а также совместный анализ получаемых с ее помощью результатов позволяют обоснованно проектировать шлифовальные инструменты с рациональной геометрией зерен для конкретных условий обработки и параметров силового нагружения.

Экспериментальные исследования по установлению пределов прочности ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формой

Для практической проверки разработанной методики исследований дополнительно проведены эксперименты по установлению пределов прочности шлифовальных зерен различных марок и зернистостей, с различными коэффициентами формы и направлениями ориентации путем их разрушения посредством одноосного сжатия на специальной установке, где моделировалось воздействие на зерна радиальной составляющей силы резания P_y .

Анализ условий работы единичных шлифовальных зерен в процессе резания показывает, что они находятся под действием сжимающей P_y и изгибающей P_z нагрузок, которые главным образом и определяют их напряженное состояние (см. рис. 4). Причем радиальная составляющая силы резания, как правило, значительно (в 2...9 раз) превосходит тангенциальную. Поэтому в большинстве методик по оценке прочности шлифовальных зерен реализуется схема одноосного сжатия (сдавливание навески зерен в пресс-форме, поштучное разрушение зерен в валковой дробилке и др.) [2, 9, 16, 22].

Известно, что определение прочности единичных зерен относится к стандартным методам оценки эксплуатационных показателей абразивных материалов (ТУ2-036-105-85). В соответствии с этим методом установление прочности единичных зерен осуществляют путем их поштучного сжатия и разрушения между двумя металлическими пластинками при постепенно возрастающей нагрузке. Для этой цели используют прибор ППЗ-1М, который имеет циферблатные весы, снабженные нагружающим устройством в виде штока, перемещаемого в вертикальном направлении с постоянной скоростью, и реверсивным электродвигателем. Шток опускается вниз, соприкасается с зерном, сжимает его и разрушает. Момент разрушения фиксируется путем визуального наблюдения за испытуемым зерном в микроскоп. Испытание считается законченным, когда неразрушенная часть зерна составляет менее половины его первоначального размера. Показателем прочности зерен во фракции служит средняя величина усилия разрушения 50 отдельных зерен.

У данного метода есть недостатки, в числе которых: отсутствие точного критерия момента разрушения зерен, отсутствие определенной ориентации зерен при испытании, трудоемкость проведения большого числа испытаний.

Для устранения этих недостатков разработана конструкция автоматической установки, являющаяся дальнейшим развитием испытательного оборудования подобного назначения [10]. Установка в автоматическом режиме обеспечивает возможность проведения испытаний в условиях, имитирующих радиальное либо тангенциальное расположение зерен на рабочей поверхности шлифовального круга. При радиальной ориентации испытуемого зерна его наибольшая ось совпадает с вектором действия усилия сжатия (перпендикулярна теоретической плоскости резания), а при тангенциальной – перпендикулярна данному вектору (параллельна теоретической плоскости резания). Радиальное (рис. 7) расположение зерна 2 на установке достигается за счет наличия продольного паза треугольной формы, выполненного в столе 5.

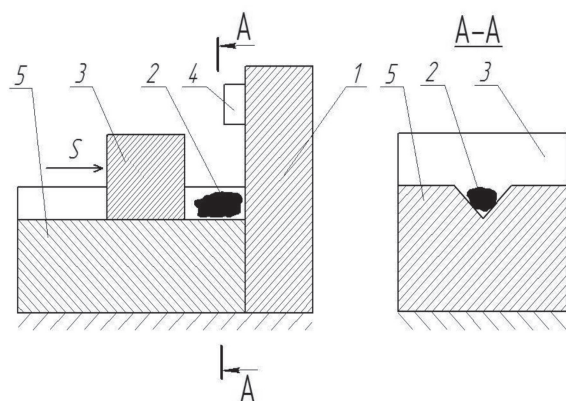


Рис. 7. Схема радиальной ориентации испытуемых шлифовальных зерен на установке для оценки их прочности

Шлифовальное зерно, попадая из питателя в этот паз, под действием силы тяжести занимает в нем положение, при котором его наибольшая ось становится параллельной вектору усилия сжатия. В подвижной пластине 3, которой осуществляется сжатие и разрушение зерна, имеется выступ, соответствующий по форме пазу в столе 5. Момент разрушения устанавливается с помощью датчика шума 4, а усилие разрушения – за счет тензодатчиков, встроенных в балку неподвижной пластины 1. Тангенциальная ориентация зерен на установке обеспечивается

посредством поворота стола на 90° так, чтобы поверхность неподвижной пластины 1 располагалась горизонтально. В этом случае зерна из питателя попадают на плоскость неподвижной пластины и располагаются на ней большей осью перпендикулярно вектору усилия сжатия.

На данной установке в отличие от предыдущих исследований, где оценивалась прочность только радиально ($\Theta = 90^\circ$) и тангенциально ($\Theta = 0^\circ$) ориентированных зерен [10], в ходе выполнения представленной работы были проведены испытания зерен при разнообразных углах их ориентации. При проведении испытаний зерна ориентировались под следующими углами: $\Theta = 0^\circ$, $\Theta = 22^\circ 30' (157^\circ 30')$, $\Theta = 45^\circ (135^\circ)$, $\Theta = 67^\circ 30' (112^\circ 30')$, $\Theta = 90^\circ$. Это было достигнуто путем установки на неподвижную пластину 1 (см. рис. 7) дополнительной металлической пластинки прямоугольной формы с предварительно подготовленными углублениями и вклеенными в них под требуемым углом ориентации испытуемыми шлифовальными зернами (рис. 8). После разрушения одного зерна пластинка с зернами вручную перемещалась таким образом, чтобы следующее зерно оказалось под сжимающим наконечником (поз. 3, рис. 7).

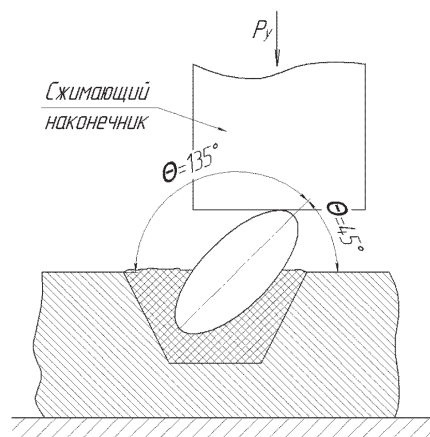


Рис. 8. Схема испытания ориентированных шлифовальных зерен на установке для оценки их прочности

При подготовке к проведению испытаний для каждого фиксированного угла ориентации зерен в исследуемой фракции отбиралось по 50 зерен. Перед вклейкой на пластинку у каждого шлифовального зерна определялся коэффициент формы, зерну присваивался порядковый номер, под которым оно подвергалось испытанию. Это позволяло установить взаимосвязь усилия раз-

рушения зерен от коэффициента их формы для различных углов ориентации. Заданная ориентация зерен обеспечивалась тем, что пластинки с подготовленными углублениями устанавливались и фиксировались на кондукторах с требуемым углом уклона относительно горизонтальной плоскости. В углубления наносился клеевой состав (эпоксидная смола, смешанная с отвердителем, близкая по свойствам к бакелитовой связке), после загустения которого зерна поштучно клеивались пинцетом. Шлифовальные зерна фиксировались в углублениях с вертикальным расположением их главных осей, а глубина заделки составляла $1/2L$.

На данной установке согласно описанной методике проведены исследования по установлению пределов прочности шлифовальных зерен двух различных марок и четырех зернистостей – нормальных электрокорундов 13A200H, 13A100H, 13A63H и карбида кремния черного 53C80H. В исследуемых фракциях абразива было испытано по 50 зерен при каждом выбран-

ном угле ориентации. Таким образом, цикл испытаний для одной фракции абразива состоял в разрушении 250 зерен с предварительно установленными коэффициентами формы. Полученные данные заносились в таблицы Excel, на основе которых строились диаграммы, выводились математические зависимости усилия разрушения зерен от коэффициента формы и сравнивались по коэффициентам корреляции.

Результаты исследования по установлению пределов прочности ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формой

По результатам проведения экспериментов установлены зависимости усилия разрушения ориентированных зерен от коэффициента формы, наиболее достоверно отражающиеся экспоненциальными функциями, типичные представители которых приведены на графиках (рис. 9, 10) и в виде следующих математических моделей.

Усилия разрушения зерен нормального электрокорунда марки 13A200H:

$$\begin{aligned}\Theta = 0^\circ: & P = 347,03 \cdot e^{-0,2086 \cdot K\Phi}, & R^2 = 0,63 \\ \Theta = 22^\circ 30' (157^\circ 30'): & P = 626,27 \cdot e^{-1,2195 \cdot K\Phi}, & R^2 = 0,79 \\ \Theta = 45^\circ (135^\circ): & P = 528,82 \cdot e^{-0,9246 \cdot K\Phi}, & R^2 = 0,70 \\ \Theta = 67^\circ 30' (112^\circ 30'): & P = 382,84 \cdot e^{-0,6296 \cdot K\Phi}, & R^2 = 0,67\end{aligned}$$

Усилия разрушения зерен нормального электрокорунда марки 13A100H:

$$\begin{aligned}\Theta = 90^\circ: & P = 447,19 \cdot e^{-0,6275 \cdot K\Phi}, & R^2 = 0,70 \\ \Theta = 0^\circ: & P = 120,28 \cdot e^{-0,2327 \cdot K\Phi}, & R^2 = 0,58 \\ \Theta = 22^\circ 30' (157^\circ 30'): & P = 471,75 \cdot e^{-1,62 \cdot K\Phi}, & R^2 = 0,77 \\ \Theta = 45^\circ (135^\circ): & P = 275,76 \cdot e^{-1,2577 \cdot K\Phi}, & R^2 = 0,71 \\ \Theta = 67^\circ 30' (112^\circ 30'): & P = 254,91 \cdot e^{-1,029 \cdot K\Phi}, & R^2 = 0,69 \\ \Theta = 90^\circ: & P = 179 \cdot e^{-0,7186 \cdot K\Phi}, & R^2 = 0,55\end{aligned}$$

Полученные результаты позволяют констатировать:

- усилия разрушения зерен и их прочность достаточно ощутимо зависят как от фактора формы, так и от фактора пространственной ориентации;

- независимо от направления ориентации с увеличением коэффициента формы зерен усилие их разрушения уменьшается, т. е. при прочих равных условиях изометрические зерна более прочны, чем игольчато-пластинчатые;

- наиболее эффективным с точки зрения обеспечения прочности зерен при одноосном

сжатии является вариант их тангенциальной ориентации ($\Theta = 0^\circ$), далее по убыванию следует случай их радиальной ориентации ($\Theta = 90^\circ$), когда главные оси зерен совпадают с вектором воздействующей сжимающей нагрузки, затем $\Theta = 67^\circ 30' (112^\circ 30')$ и наименее рациональными являются углы ориентации $\Theta = 45^\circ (135^\circ)$ и $\Theta = 22^\circ 30' (157^\circ 30')$;

- разница в прочности различно ориентированных зерен тем более заметна, чем больший коэффициент формы они имеют.

Для адекватного сопоставления результатов оценки напряженного состояния зерен при

работе в отрезных шлифовальных кругах (см. рис. 6, а, б, в) с результатами прочностных испытаний шлифовальных зерен методом одноосного сжатия (см. рис. 9, 10) ввиду различий в схемах нагружения зерен проведен дополнительный анализ напряжений, возникающих в шлифовальных зернах под воздействием силы резания (т. е. совместного воздействия ее составляющих P_y и P_z) и отдельного воздействия сжимающей силы P_y (рис. 11).

Анализ полученных данных (рис. 11) показывает, что график распределения максимальных напряжений в шлифовальных зернах при различных углах ориентации от действия сжимающей силы P_y соответствует результатам испытаний на прочность ориентированных шлифовальных зерен методом одноосного сжатия (см. рис. 9, 10). Наименьшие напряжения в зернах возникают при их тангенциальной ориентации ($\Theta=0^\circ$) и соответственно для разрушения зерен при данном варианте ориентации требуются наибольшие усилия. Далее по возрастанию напряжений следует случай радиальной ориентации зерен

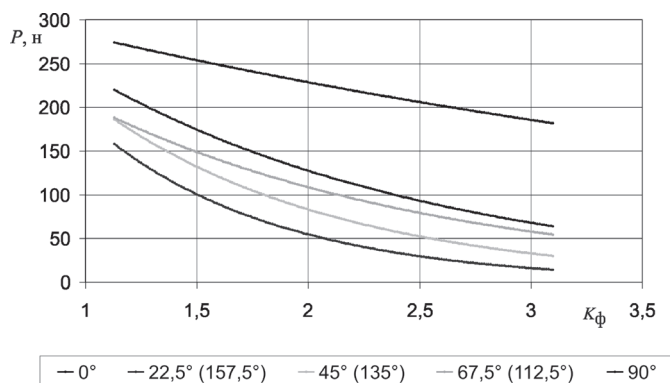


Рис. 9. Зависимости усилия разрушения P шлифовальных зерен 13A200H от коэффициента формы K_ϕ при различных углах ориентации Θ

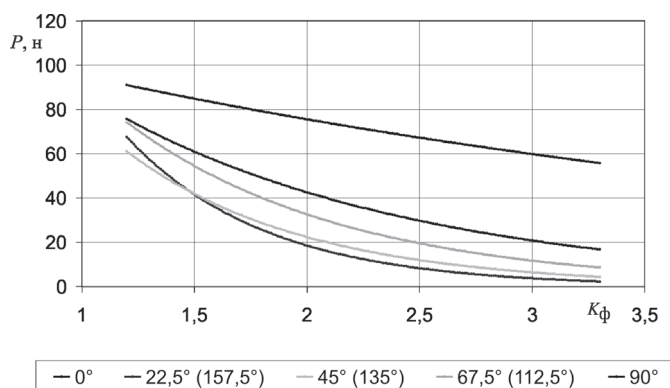


Рис. 10. Зависимости усилия разрушения P шлифовальных зерен 13A100H от коэффициента формы K_ϕ при различных углах ориентации Θ

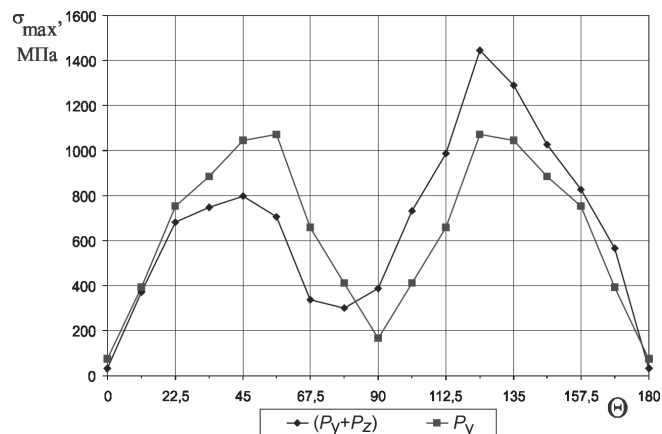


Рис. 11. Максимальные напряжения в модели шлифовального зерна 13A40H с $K_\phi = 4,8$ по границе заделки в связку при различных углах ориентации, закреплении до $1/2L$ под действием силы резания ($P_y + P_z$) и отдельно P_y

($\Theta = 90^\circ$), а наибольшие напряжения в зернах фиксируются при углах ориентации $\Theta = 45^\circ$ (135°) и $\Theta = 22^\circ 30'$ ($157^\circ 30'$), что коррелирует с результатами прочностных испытаний зерен.

Анализ данных (см. рис. 10) показывает также, что наличие P_z в сравнении со случаем одноосного сжатия зерен приводит к тому, что наименьшие максимальные напряжения в зернах (после варианта их тангенциальной ориентации) фиксируются при углах ориентации, практически совпадающих или близких к направлению вектора результирующей силы резания P (в данном случае $\Theta = 67^\circ 30'$ и $\Theta = 78^\circ 45'$). Кроме того, воздействие P_z в диапазоне углов ориентации $\Theta = 0 \dots 90^\circ$ приводит к более равномерному распределению напряжений в теле зерен и снижению их максимальных величин, а в диапазоне углов ориентации $\Theta = 90 \dots 180^\circ$ воздействие P_z приводит к концентрации напряжений под свесом выступающей части зерен и росту их максимальных значений. При этом очевидно, что с уменьшением соотношения величин P_y и P_z выявленные отличия картины напряжений от варианта одноосного сжатия будут возрастать. Это дополнительно подтверждает, что для каждого инструмента и вида шлифования целесообразно находить рациональные углы ориентации зерен с учетом всех особенностей их нагружения в инструменте.

Выводы

Таким образом, в представленной работе удалось разработать и реализовать на практике методику по анализу передних углов и напряжений



у ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формой. В ходе разработки методики созданы и зарегистрированы программы для ЭВМ по количественной оценке формы шлифовальных зерен и их передних углов при различных вариантах ориентации. Экспериментальным путем установлено, что разработанная методика пригодна для проектирования шлифовальных инструментов с рациональной геометрией зерен. Кроме того, в процессе исследований подтверждено, что факторы формы и ориентации шлифовальных зерен существенно влияют на их передние углы и прочность и, как следствие, на эксплуатационные показатели шлифовальных инструментов в целом. Результаты исследований показывают, что совместное упорядочение факторов формы и ориентации зерен открывает перспективу дальнейшего повышения эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов и возможность проектирования инструментов с заданными свойствами.

Установлено также следующее:

- для достижения максимальной режущей способности шлифовальных инструментов, снижения деформаций обрабатываемого материала и температуры резания необходимо применять зерна игольчато-пластинчатой формы (с максимальными значениями K_{ϕ}) и располагать их в инструментах под углами ориентации порядка $\Theta = 22,5 \dots 45^\circ$;

- для обеспечения максимальной стойкости шлифовальных инструментов, при прочих равных условиях, целесообразно использовать зерна изометрической формы (с минимальными значениями K_{ϕ}), а также ориентировать шлифовальные зерна в тангенциальном направлении ($\Theta = 0^\circ$);

- шлифовальные инструменты с повышенной режущей способностью и одновременно с достаточно высокой стойкостью можно изготовить, ориентируя шлифовальные зерна под углами наклона, близкими к направлению вектора силы резания P , действующей на инструмент в процессе эксплуатации;

- для отрезных шлифовальных кругов, изготавливаемых из зерен нормальных электрокорундов и используемых для обработки конструкционных сталей, при эксплуатации которых радиальная составляющая силы резания P_y в 3...5 раз превосходит тангенциальную составля-

ющую P_z , может быть рекомендован рациональный угол ориентации зерен порядка $\Theta = 67^\circ 30'$.

Реализовать перечисленные выводы и рекомендации на практике можно путем применения запатентованного способа изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зернами [17] и упорядочения формы зерен.

Список литературы

1. Любомудров В.Н. Абразивные инструменты и их изготовление / В.Н. Любомудров, Н.Н. Васильев, Б.И. Фальковский. – М.; Л.: МАШГИЗ, 1953. – 375 с.
2. Opitz H. Untersuchug der Eigenschaften von Schleifkörpern und ihr Verhalten im Schleifvorgang / H. Opitz, J. Peklenik, K. Brückner / – Köln und Opladen: Westdeutscher Verlag, 1964. – 63 S.
3. Лурье Г.Б. Абразивные инструменты и их эксплуатация. – М.: Машиностроение, 1971. – 62 с.
4. Коротков А.Н. Эксплуатационные свойства абразивных материалов : монография. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1992. – 122 с.
5. Абразивная и алмазная обработка. Справочник / под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
6. Грановский Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
7. Ваксер Д.Б. Пути повышения производительности при шлифовании. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.
8. Зайцев А.Г. Влияние формы алмазного зерна на износостойкость круга при шлифовании твердых сплавов // Вестник машиностроения. – 1975. – № 2. – С. 76–77.
9. Коротков А.Н. Повышение эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов: монография / ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2005. – 232 с.
10. Коротков В.А. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов: монография. – М.: Машиностроение, 2009. – 178 с.
11. Абразивные материалы и инструменты. Каталог / под. ред. В.Н. Тыркова. – М.: ВНИИТЭМР, 1986. – 358 с.
12. Плисс Д.А. Вибрационные сепараторы / Д.А. Плисс, В.А. Анахин, В.Н. Монахов. – М.: Недра, 1991. – 157 с.
13. Люкин В.С. Повышение работоспособности шлифовальных лент путем использования зерен с контролируемой формой и ориентацией: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2007. – 25 с.
14. А. с. 582957 СССР, М. Кл³. В 24D 3/00. Способ изготовления абразивного инструмента / В.И. Зайцев. – № 2198300/25-08; заявл. 11.12.75; опубл. 05.12.77, Бюл. № 45. – 2 с.

15. А. с. 1495100 СССР, М. Кл.³. В 24D 5/00. Способ изготовления абразивного инструмента / Б.Н. Бирюков, И.М. Буюкли, Л.В. Попова и др. – № 4281271/31-08; заявл. 13.07.87; опубл. 23.07.89, Бюл. № 27. – 3 с.
16. Ковальчук Ю.М. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / Ю.М. Ковальчук, В.А. Букин, Б.А. Глазовский и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.
17. Патент на изобретение № 2369474. Способ изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зернами / В.А. Коротков. – № 2008105086; заявл. 11.02.08; опубл. 10.10.09. Бюл. № 28.
18. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613051. Форма шлифовальных зерен в объеме / В.А. Коротков, Г.М. Рылов. – № 2006612327; заявл. 4.07.06; опубл. 1.09.06.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614263. Угол наклона шлифовальных зерен / В.А. Коротков, Е.М. Минкин. – № 2011612443; заявл. 8.04.11; опубл. 30.05.11.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615114. Передние углы ориентированных шлифовальных зерен / В.А. Коротков, Е.М. Минкин. – № 2011613167; заявл. 4.05.11; опубл. 29.07.11.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616506. Геометрические модели шлифовальных зерен / В.А. Коротков, Е.М. Минкин – № 2011614679; заявл. 27.06.11; опубл. 19.08.11.
22. Комине С. Испытание прочности алмазных зерен / С. Комине, А. Охара // ВЦП – № Ц-56600; пер. с яп. яз. – Кикай косаку. 1963. Т. 10. – № 55. – С. 42–49.

OBRAHOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 62–77

Geometry and stress condition of the oriented abrasive grains with controlled form

Korotkov V.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: korotkov-va@mail.ru

Minkin E.M., Engineer

Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 28 Vesennaya st., 650000, Kemerovo, Russian Federation

Abstract

The efficiency of the polishing process is determined by the properties of abrasive grains, including its form and orientation in the body of the grinding tool. It is possible to improve the operational factors of the grinding instruments by ordering of the grain geometry, selection of the rational form and orientation of abrasive grains for specific processing conditions and parameters of the power load. To solve this problem the research technique for estimation of the abrasive grains front angle parameter and tension value parameter with the form and orientation parameters is proposed. The offered technique is successfully tested in practice. During the development of this technique the interrelation of the alumina abrasive grain front angle parameter with the form, orientation and wear parameters is found. It is established that the minimum values of the front angles are fixed at grains of an isometric form and tangentially oriented grains. The maximum values of front angles are fixed at the needle and lamellar grains oriented under angles $\Theta = 22,5^\circ \div 45^\circ$ to the cutting plane. The analysis of tension in the orientated alumina abrasive grains of various forms in cutting discs is also made. It is established that for cutting discs the rational angle of the abrasive grains orientation is about $\Theta = 67^\circ 30'$. Practical enquiry of the developed technique is made by carrying out the experiments for determination of ultimate strength of the orientated abrasive grains with a controlled form of various brands and sizes by monoaxial compression.

Keywords:

polishing process, grinding instruments, cutting discs, abrasive grains, front angle of the abrasive grains, the form parameter coefficient, orientation angle of the abrasive grains, wear out of the abrasive grains, stress value in the abrasive grains, solidity of the abrasive grains.

References

1. Liubomudrov V.N., Vasil'ev N.N., Fal'kovskii B.I. *Abrazivnye instrumenty i ikh izgotovlenie* [Abrasive tools and their fabrication]. Moscow – Leningrad, MASHGIZ Publ., 1953. 375 p.
2. Opitz H., Peklenik J., Brückner K. Untersuchug der Eigenschaften von Schleifkörpern und ihr Verhalten im Schleifvorgang. Köln und Opladen. Westdeutscher Verlag, 1964. 63 p.
3. Lur'e G.B. *Abrazivnye instrumenty i ikh ekspluatatsiia* [Abrasive tools and their operation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 62 p.
4. Korotkov A.N. *Ekspluatatsionnye svoistva abrazivnykh materialov: monografiia* [Operational properties of abrasives: monograph]. Krasnoyarsk, KraSU Publ., 1992. 122 p.
5. Reznikov A.N., Aleksentsev E.I., Barats Ya.I. et al. *Abrazivnaia i almaznaia obrabotka. Spravochnik* [Abrasive and diamond processing. Handbook.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 391 p.
6. Granovskii G.I., Granovskii V.G. *Rezanie metallov* [Cutting metals]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1985. 304 p.
7. Vakser D.B. *Puti povysheniia proizvoditel'nosti pri shlifovanii* [Ways to increase productivity in grinding]. Moscow, BMSTU Publ., 2001. 448 p.
8. Zaitsev A.G. Vliianie formy almaznogo zerna na iznosostoikost' kruga pri shlifovanii tverdykh splavov [Influence of the shape of the diamond grains on the wear resistance range for grinding carbide]. *Vestnik Mashinostroeniya - Russian Engineering Research*, 1975, no. 2, pp. 76–77.
9. Korotkov A.N. *Povyshenie ekspluatatsionnykh vozmozhnostei shlifoval'nykh instrumentov: monografiia* [Improving operational capability of grinding tools: Monograph]. Kemerovo, KuzSTU Publ., 2005. 232 p.
10. Korotkov V.A. *Povyshenie ekspluatatsionnykh vozmozhnostei otreznykh shlifoval'nykh krugov: monografiia* [Improving operational capability cutting grinding wheels: Monograph]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 178 p.
11. Tyrkov V.N., Burov V.S., Glagovskii B.A., Grigor'eva N.I. et al. *Abrazivnye materialy i instrumenty. Katalog* [Abrasive materials and tools. Catalogue]. Moscow, VNIITEMR Publ., 1986. 358 p.
12. Pliss D.A., Anakhin V.A., Monakhov V.N. *Vibratsionnye separatory* [Vibratory separators]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 157 p.
13. Liukshin V.S. *Povyshenie rabotosposobnosti shlifoval'nykh lent putem ispol'zovaniia zeren s kontroliruemoi formoi i orientatsiei*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improving efficiency of grinding bands by use of a controlled grain shape and orientation. Author's abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Kemerovo, 2007. 25 p.
14. Zaitsev V.I. *Sposob izgotovleniia abrazivnogo instrumenta* [A method for manufacturing abrasive tools]. Author's Certificate USSR, no. 582957, 1977.
15. Biriukov B.N., Buiukli I.M., Popova L.V. et al. *Sposob izgotovleniia abrazivnogo instrumenta* [A method for manufacturing abrasive tools]. Author's Certificate USSR, no. 1495100, 1989.
16. Koval'chuk Yu.M., Bukin V.A., Glagovskii B.A. et al. *Osnovy proektirovaniia i tekhnologiia izgotovleniia abrazivnogo i almaznogo instrumenta* [Basis of design and fabrication of abrasive and diamond tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 288 p.
17. Korotkov V.A. *Sposob izgotovleniia shlifoval'nykh instrumentov s orientirovannymi zernami* [Method of manufacturing grinding tools with a grain-oriented]. Patent RF, no. 2369474, 2009.
18. Korotkov V.A., Rylov G.M. *Forma shlifoval'nykh zeren v ob'eme* [Shape of grinding grains in a volume]. Certificate of official registration of computer programs, no. 2006613051, 2006.
19. Korotkov V.A., Minkin E.M. *Ugol naklona shlifoval'nykh zeren* [Tilt angle of grinding grains]. Certificate of official registration of computer programs, no. 2011614263, 2011.
20. Korotkov V.A., Minkin E.M. *Perednie ugly orientirovannykh shlifoval'nykh zeren* [Hook angles of grinding grain oriented]. Certificate of official registration of computer programs, no. 2011615114, 2011.
21. Korotkov V.A., Minkin E.M. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia* [Geometric model of grinding grains]. Certificate of official registration of computer programs, no. 2011616506, 2011.
22. Komine S., Okhara A. *Ispytanie prochnosti almaznykh zeren* [Test the strength of diamond grains. Japanese translation: Kikai kosaky]. 1963, Vol. 10, no. 55, pp. 42–49.

Received 10 January 2014

Revised 30 April 2014

Accepted 17 May 2014