

# ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРИЕНТИРОВАННЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ЗЕРЕН

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

Статья поступила 27 июля 2012 года

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

Установлена взаимосвязь передних углов шлифовальных зерен с разновидностями их формы, пространственной ориентации и износа, а также с величинами напряжений, возникающих в зернах при работе.

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

Прочность зерен, находящихся в шлифовальных инструментах, зависит от ряда факторов, в числе которых: физико-механические свойства абразивных материалов, глубина заделки зерен в связку, зернистость, номер структуры, характер воздействия силовой нагрузки, схема шлифования, форма инструментов и др. В том числе на прочность зерен влияет геометрия их режущей части, которая, в свою очередь, определяется их формой и расположением в теле инструментов, а также характером износа и оказывает существенное влияние на эффективность процесса резания. В этом контексте представляется полезным исследование зависимости величин передних углов ориентированных шлифовальных зерен от разновидности их формы с учетом фактора износа, а также установление взаимосвязи формы и ориентации зерен с величинами напряжений, возникающих в них при работе.

Исследования проводились на примере зерен нормального электрокорунда марки 13А40Н, для которых на первом этапе произведена количественная оценка формы в трехмерном пространстве. Форма зерен оценивалась с помощью специально разработанной методики и программы для ЭВМ [1, 2] путем использования понятия коэффициента формы, равного отношению диаметров описанных вокруг контуров зерен сфер ( $D_{оп}$ ) к диаметрам вписанных в них сфер ( $D_{вп}$ ). В соответствии с методикой на изображениях зерен, полученных с помощью микроскопа и цифрового фотоаппарата, проводились главные оси, которые разбивались на 12 – 20 участков (через 25 мкм

истинного размера зерна), на которых проводилась оценка передних углов. Таким измерениям подвергались не менее 50 отдельных зерен из исследуемой фракции, а на основе полученных данных строился график (рис. 1) и математические модели.

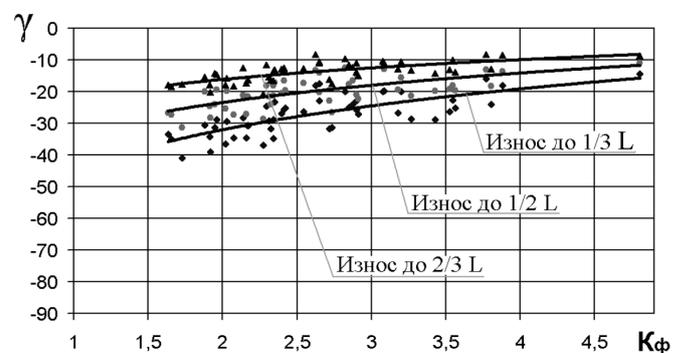


Рис. 1. Зависимость величин передних углов  $\gamma$  радиально ориентированных к плоскости резания зерен от коэффициента формы  $K_\phi$  с учетом фактора износа

$$\begin{aligned} \text{Износ до } 1/3 L: \gamma &= 18,61 \cdot \ln(K_\phi) - 44,91 \quad R^2 = 0,65; \quad (1) \\ \text{Износ до } 1/2 L: \gamma &= 13,41 \cdot \ln(K_\phi) - 32,69 \quad R^2 = 0,54; \quad (2) \\ \text{Износ до } 2/3 L: \gamma &= 9,02 \cdot \ln(K_\phi) - 22,38 \quad R^2 = 0,59. \quad (3) \end{aligned}$$

Представленные математические модели (1) – (3) получены путем построения ряда линейных и логарифмических зависимостей и последующего выбора среди них наиболее достоверных по наибольшему коэффициенту корреляции.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что независимо от величины износа с увеличением коэффициента формы радиально ориентированных к плоскости резания шлифовальных зерен их перед-



ние углы становятся более острыми. При этом чем дольше зерно работает, т.е. изнашивается вдоль главной оси и находится в теле инструмента, тем острее (в среднем) становится его передний угол. Так, при переходе от  $K_{\phi} = 1,6$  до  $K_{\phi} = 4,8$  и при износе до 1/3 по главной оси, передний угол зерен находится в пределах  $-36,1^{\circ} \dots -15,7^{\circ}$ ; при износе до 1/2 по главной оси  $\gamma = -26,4^{\circ} \dots -11,7^{\circ}$ ; при износе до 2/3 по главной оси  $\gamma = -18,1^{\circ} \dots -8,2^{\circ}$ .

В дальнейшем производилась оценка величин передних углов шлифовальных зерен при других вариантах их ориентации относительно плоскости резания. С целью сокращения времени и трудоемкости оценки передних углов шлифовальных зерен разработана и реализована методика, основанная на построении в графическом редакторе «Компас» моделей шлифовальных зерен с различными коэффициентами формы и определения с их помощью величин средних передних углов при различной ориентации и степени износа.

Для реализации методики разработан специальный программный комплекс, позволяющий поворачивать исследуемые изображения зерен под требуемым углом относительно плоскости резания и определять передний угол во всех точках контура зерен [3, 4].

В результате для каждой исследуемой модели зерна с определенным коэффициентом формы создавалась матрица значений передних углов для различных вариантов их ориентации 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  $K_{\phi}$  и угла пространственной ориентации  $\Theta$ , измеряемого между главной (т.е. наибольшей) осью зерна  $L$  и плоскостью резания (рис. 2).

Результаты исследований позволяют констатировать, что независимо от коэффициента формы, чем

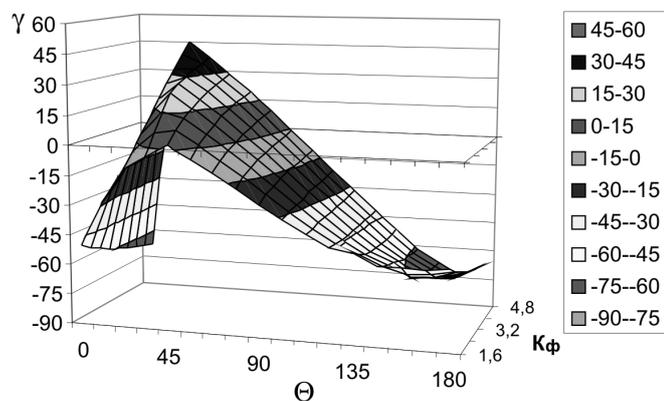


Рис. 2. Зависимости передних углов  $\gamma$  зерен от коэффициента их формы  $K_{\phi}$  и угла пространственной ориентации  $\Theta$  при износе до 1/2L

дольше шлифовальное зерно работает, т.е. изнашивается вдоль главной оси и находится в теле инструмента, тем острее (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  $-57^{\circ} \dots -6^{\circ}$  (износ до 1/3L) и  $-26^{\circ} \dots +9^{\circ}$  (износ до 2/3L).

При  $K_{\phi} = 4,8$  передние углы шлифовальных зерен в зависимости от угла ориентации  $\Theta$  изменяются в диапазоне  $-75^{\circ} \dots +39^{\circ}$  (износ до 1/3L) и  $-37^{\circ} \dots +42^{\circ}$  (износ до 2/3L). Таким образом, одно и то же зерно, по-разному ориентированное относительно плоскости резания, характеризуется значительной разницей величин передних углов. Она достигает  $30^{\circ} \dots 51^{\circ}$  у изометрических зерен ( $K_{\phi} = 1,6$ ) и  $79^{\circ} \dots 114^{\circ}$  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 максимально острых положительных значений при углах ориентации  $\Theta = 22,5^{\circ} \dots 45^{\circ}$ .

Далее исследовались величины напряжений, возникающих в шлифовальных зернах при различных вариантах их ориентации в теле инструмента. С этой целью предварительно определялись силы резания, действующие на зерна марки 13A40H при работе отрезных шлифовальных кругов с характеристикой 230×4×22 13A40H T2 БУ 80 м/с [1]. Для этого осуществлялась резка заготовок (труба 21,3×2,8 из стали 10) на скорости  $V = 80$  м/с и с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу  $F = 32Н$  ( $P_y = 32Н$ ). В процессе резки заготовок среди прочих показателей определялась эффективная мощность резания, исходя из величины которой была установлена тангенциальная сила резания ( $P_z = 8,46 Н$ ).

После этого цифровым фотоаппаратом в режиме макросъемки фотографировались участки рабочей поверхности отрезных кругов и производился подсчет количества шлифовальных зерен на единице площади поверхности инструментов в графическом редакторе Paint (рис. 3).

Установлено, что в среднем на рабочей поверхности исследуемых отрезных кругов число зерен со-

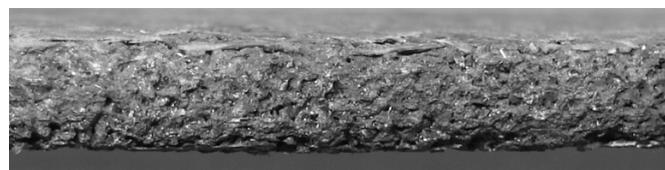


Рис. 3. Участок рабочей поверхности отрезного круга 230×4×22 13A40H T2 БУ 80 м/с

ставляет  $N_s = 2,68$  зерен/ $\text{мм}^2$ . Исходя из этой величины, а также из площади контакта отрезного круга с разрезаемой заготовкой ( $S = 22,4 \text{ мм}^2$ ) установлено количество шлифовальных зерен, одновременно участвующих в работе ( $N_s = 60$  зерен) и величины сил, действующих на единичное шлифовальное зерно на поверхности круга ( $P_y = 0,5333 \text{ Н}$ ;  $P_z = 0,141 \text{ Н}$ ). Полученные данные позволили произвести расчет напряжений, возникающих в моделях шлифовальных зерен марки 13A40H с различными коэффициентами формы и вариантами ориентации в теле инструмента в программном комплексе SolidWorks (рис. 4).

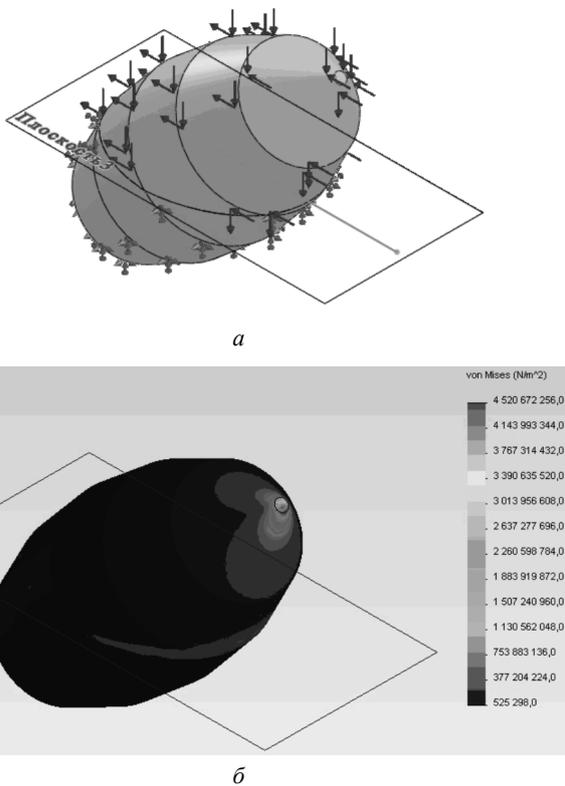


Рис. 4. Схема нагружения (а) и картина напряжений (б) в модели шлифовального зерна 13A40H с  $K_\phi = 2,4$  и углом ориентации  $\Theta = 45^\circ$  до  $1/2L$ , закрепленной в связку

Программные настройки при проведении расчетов: линейная упругая изотропная модель; материал – нормальный электрокорунд; предел прочности при растяжении  $8,5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ ; предел прочности при сжатии  $7,6 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ ; модуль упругости  $3,74 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ ; коэффициент Пуассона 0,22; массовая плотность  $4025 \text{ кг/м}^3$ ; модуль сдвига  $1,5 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ ; коэффициент теплового расширения  $8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$ . Тип сетки: сетка на твердом теле на основе кривизны; 4 точки Якобиана; максимальный размер элемента 0,00968809 мм; минимальный размер элемента 0,00322933 мм.

Полученные результаты показывают, что при всех вариантах ориентации зерен наиболее нагруженной их частью является зона вблизи вершин. Следующая

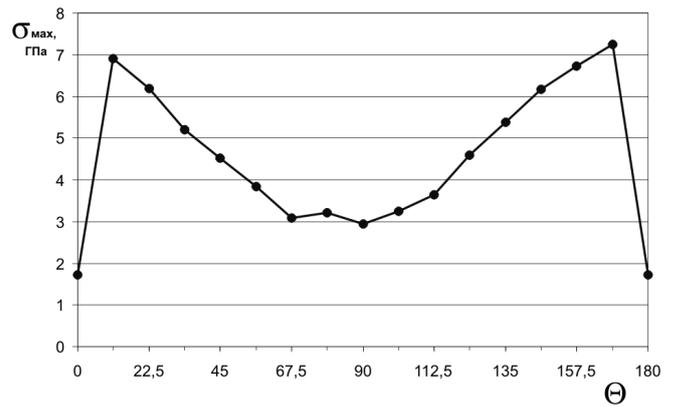


Рис. 5. Зависимость максимальных напряжений  $\sigma_{\text{max}}$  в модели шлифовального зерна 13A40H с  $K_\phi = 2,4$  до  $1/2L$ , закрепленной в связке от угла ориентации  $\Theta$

по нагруженности зона находится вблизи границы заделки зерна в связку.

Сравнение полученных данных по величинам напряжений, возникающих при различных вариантах ориентации зерен (рис. 5), с данными по величинам их передних углов (рис. 6) позволяет сформулировать рекомендации по рациональным вариантам ориентирования зерен в шлифовальных инструментах.

Так, из полученных данных следует, что наименьшие напряжения возникают в зерне при его тангенциальной ориентации, так как его вершина частично заделана в связку. Несколько большие, но весьма близкие значения напряжений наблюдаются при радиальной ориентации зерна. Чем больше угол  $\Theta$  отличается от  $90^\circ$ , тем большие напряжения возникают в зерне. При этом во всех случаях более рациональным является ориентирование зерна вершиной навстречу силе  $P_z$ .

Наибольшие значения передних углов зерен наблюдаются в диапазоне ориентации  $\Theta = 11^\circ 15' \dots 90^\circ$ .

Таким образом, совместно анализируя полученные данные (рис. 5 и 6) можно сделать вывод, что рациональный интервал ориентирования зерен со-

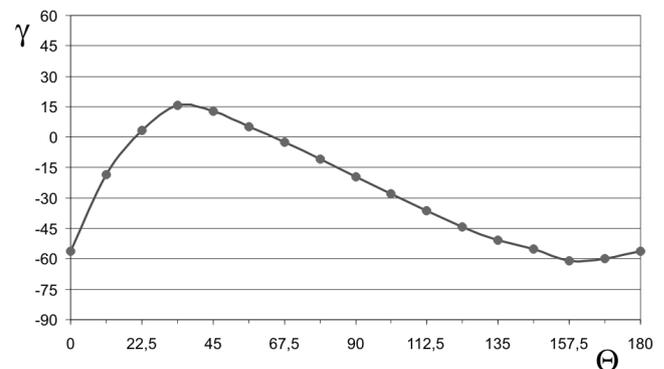


Рис. 6. Зависимость передних углов  $\gamma$  у модели шлифовального зерна 13A40H с  $K_\phi = 2,4$  до  $1/2L$ , закрепленной в связке от угла ориентации  $\Theta$

ставляет  $\Theta = 67^\circ 30' \dots 90^\circ$ . Следует также отметить, что полученная картина напряжений в основном характеризует контактные напряжения на вершинах зерен и отражает интенсивность процессов их микро-скалывания.

Для определения объемной прочности зерен проведены исследования по оценке напряженного состояния на границе их заделки в связку. Для этого в связи с особенностями функционирования программного комплекса SolidWorks контур моделей зерен (см. рис. 4) преобразован по характерным точкам в единую криволинейную поверхность без разбивки на секторы. К полученной модели зерна прикладывались силы, действующие на реальное единичное шлифовальное зерно ( $P_y = 0,5333$  Н;  $P_z = 0,141$  Н), при различных вариантах 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 зерна в связку: слева, по центру и справа (рис. 7 и 8).

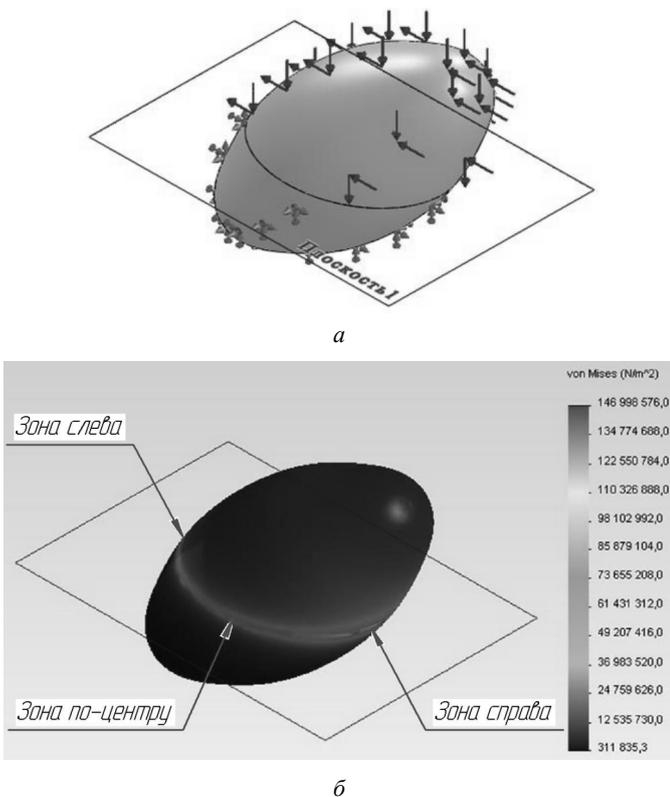


Рис. 7. Схема нагружения (а) и картина напряжений по границе заделки в связку (б) в модели шлифовального зерна 13А40Н с  $K_\phi = 2,4$  и углом ориентации  $\Theta = 45^\circ$  до  $1/2L$ , закрепленной в связке

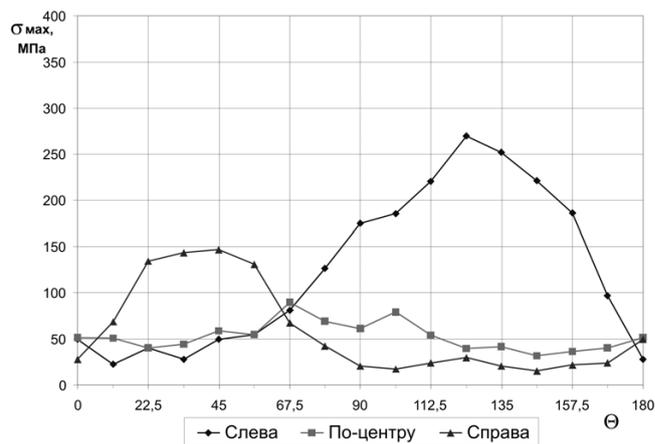


Рис. 8. Напряжения в модели шлифовального зерна 13А40Н, закрепленной до  $1/2L$ , с  $K_\phi = 2,4$  по границе заделки в связку при различных углах ориентации

Данные графика (рис. 8) 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 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 результирующей силы  $P$  от действия сил  $P_y$  и  $P_z$ . В данном случае  $P_y = 0,5333$  Н,  $P_z = 0,141$  Н, т.е. эти силы имеют соотношение 3,78:1, и вектор результирующей силы  $P$  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 ориентации  $\Theta = 67^\circ 30'$ .

При последующем 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 показывают, что во всех случаях более рациональным является ориентирование зерна вершиной навстречу направлению действия силы  $P_z$ . Это находит объяснение, так как при ориентации зерна навстречу  $P_z$  вектор ре-

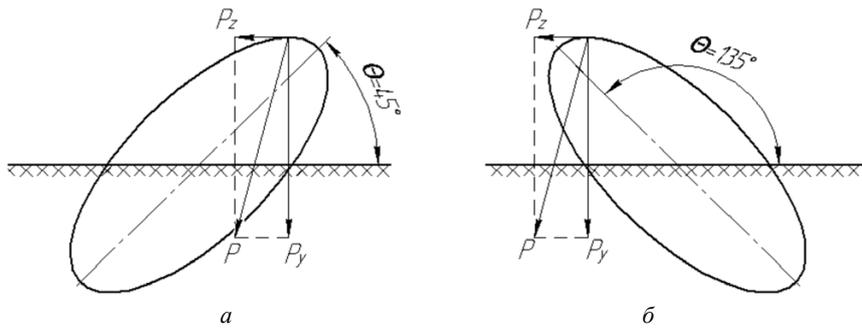


Рис. 9. Направление действия сил резания по отношению к главной оси зерна при его расположении вершиной навстречу силе  $P_z$  (а) и вершиной от направления действия силы  $P_z$  (б)

зультирующей силы  $P$  находится вблизи от главной оси зерна. При расположении зерна вершиной от направления силы  $P_z$  результирующая сила  $P$  действует под большими углами по отношению к главной оси зерна, создавая максимальные напряжения в «зоне слева» (рис. 9).

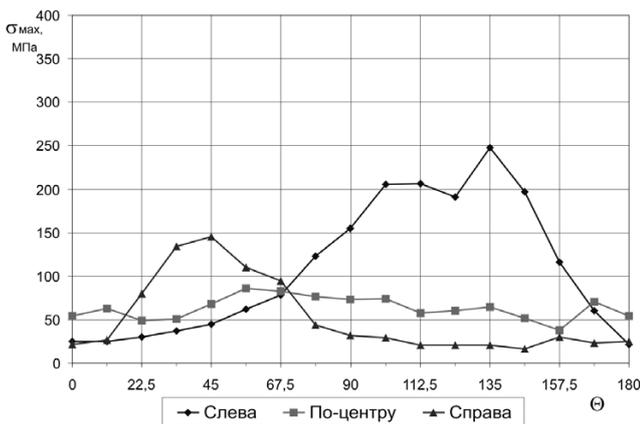


Рис. 10. Напряжения в модели шлифовального зерна 13A40H, закрепленной до  $2/3L$ , с  $K_\phi = 2,4$  по границе заделки в связке при различных углах ориентации

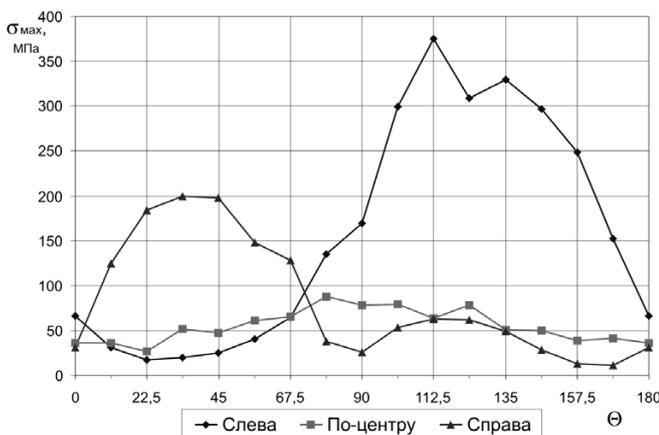


Рис. 11. Напряжения в модели шлифовального зерна 13A40H, закрепленной до  $1/3L$ , с  $K_\phi = 2,4$  по границе заделки в связке при различных углах ориентации

Аналогичные по характеру распределения данные (рис. 8) получены при исследовании напряжений в моделях зерна при различных вариантах ориентации и закреплении в связке до  $2/3L$  и до  $1/3L$  (рис. 10 и 11).

В результате обобщения данных (рис. 8, 10 и 11) получен сводный график максимальных напряжений в модели шлифовального зерна 13A40H с  $K_\phi = 2,4$  по границе заделки в связке при различных углах ориентации и при закреплении в связке до  $2/3L$ , до  $1/2L$  и до  $1/3L$  (рис. 12).

Из графика (рис. 12) следует, что 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  $2/3L$ ).

Изменения напряжений в зависимости от угла ориентации зерна во всех рассматриваемых случаях имеет одинаковый характер.

Обобщая приведенные данные, можно сделать вывод, что наименьшие напряжения на вершинах зерен (см. рис. 5) и по границе заделки в связке (рис. 12) фиксируются при их тангенциальной ориентации относительно плоскости резания ( $\Theta = 0^\circ$ ). Однако данный вариант ориентации зерен является наименее эффективным с точки зрения процесса резания, поскольку передние углы зерен здесь достигают наименьших значений ( $\gamma = -56^\circ$ ) из возможных в рассматриваемом случае, и резание такими зернами весьма затруднено (см. рис. 6). Следует также отметить, что напряжения на вершинах зерен определяют

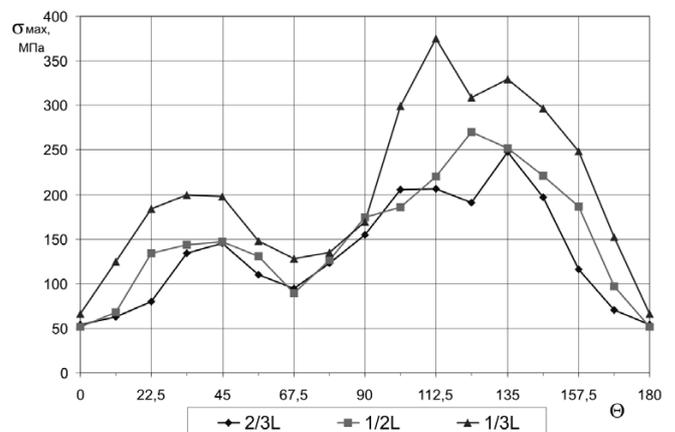


Рис. 12. Максимальные напряжения в модели шлифовального зерна 13A40H с  $K_\phi = 2,4$  по границе заделки в связке при различных углах ориентации и при закреплении в связке до  $2/3L$ ,  $1/2L$  и  $1/3L$



интенсивность их износа скалыванием, а напряжения по границе заделки в связку – износа в виде объемного разрушения. 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 нулевому ( $\gamma = -3^{\circ}$ ). Таким образом, при  $\Theta = 67^{\circ}30'$  шлифовальные зерна в отрезных кругах эффективно срезают металл и испытывают при этом напряжения, близкие к минимально возможным при отрезном шлифовании.

Ведутся дальнейшие исследования по установлению рациональных углов ориентации зерен с учетом разновидностей их формы и при других вариантах силового нагружения в процессе резания.

### Список литературы

1. *Коротков В.А.* Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов: монография. – М.: Машиностроение, 2009. – 178 с.
2. *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.
3. *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.
4. *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.

### Geometrical and solidity parameters research of the orientated abrasive grains

V.A. Korotkov, E.M. Minkin

Interconnection of the abrasive grain front angle parameter with the form, orientation and wear out parameters is shown. Besides that, the tension value in the abrasive grains during its work is shown.

**Key words:** 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, solidity of the abrasive grains, tension value in the abrasive grains.