

УДК 621.923

**А.В. Байков**, канд. техн. наук.Донецкий национальный технический университет  
Тел.: +38 (062) 3010805; E-mail: [tm@mech.dgtu.donetsk.ua](mailto:tm@mech.dgtu.donetsk.ua)

## ОПИСАНИЕ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛАСТИЧНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА В ЗОНЕ КОНТАКТА С ЗАГОТОВКОЙ

*Рассмотрены способы математического описания распределения по высоте вершин алмазных зерен шлифовальных кругов с помощью различных законов распределения. Оценена погрешность описания разновысотности вершин активных зерен. Рассмотрен характер распределения активных зерен в зоне контакта с заготовкой для различных законов распределения.*

**Ключевые слова:** Алмазное зерно, плотность распределения, упругое перемещение, трансформация рабочей поверхности.

**A.V. Baykov**

### DESCRIPTION OF THE ELASTIC GRINDING TOOLS WORKING SURFACE IN THE CONTACT AREA WITH THE WORKPIECE

*The methods of mathematical description of distribution in altitude of diamond grains tips for grinding wheels by the different distribution laws are considered. Description error of difference of altitude of active grains tips is assessed. Considered the character of the distribution of active grains in the contact area with the workpiece for various distribution laws*

**Key words:** Diamond grain, density of distribution, elastic movement, the working surface transformation

#### 1. Введение

В настоящее время в машиностроении все более широко применяют детали из природного гранита и синтегранита (станины, стойки, траверсы, столы, угольники, аэростатические направляющие и измерительные плиты станков и контрольно-измерительных машин). Одним из наиболее важных этапов обработки деталей из природного камня является тонкое алмазное шлифование, т.к. качество поверхности на заданном этапе определяет трудоемкость заключительной операции обработки - полирования. На этом этапе шлифования все более активно используется инструмент на полимерном эластичном связующем, обладающий определенной спецификой характера съема материала. Вследствие упругих свойств полимерной связки алмазные зерна под действием усилий резания перемещаются от статического положения в направлении нормальной составляющей силы резания увеличивая количество одновременно работающих алмазных зерен и уменьшается разновысотность режущих профилей. Поэтому при обработке эластичным инструментом задается не определенная глубина резания, а требуемая величина давления в зоне обработки [1].

На показатели качества и производительности обработки при шлифовании определяющее влияние оказывает характер геометрии рабочей поверхности шлифовального круга (РПК).

В настоящее время, рассматривая распределение формообразующих элементов шлифовального круга, учитывают смещение кривой плотности вероятностей вершин зерен по глубине инструмента на величину износа зерен и величину упругих деформаций [2]. Результаты исследования продуктов диспергирования при шлифовании эластичным инструментом доказывают, что для данного инструмента основным видом износа является вырыв зерен, возможно, с фрагментами связки.

Поэтому можно полагать, что для эластичного инструмента величина упругих деформаций существенно превышает величину износа зерен и последнюю можно не учитывать без существенного искажения результатов описания распределения зерен.

Обычно закон распределения вершин зерен над уровнем связки получают на основании обработки экспериментальных данных, причем описывают плотность вероятности распределения всех выступающих над уровнем связки алмазных зерен. Однако в удалении обрабатываемого материала принимают участие преимущественно наиболее выступающие зерна, поэтому используемые законы могут давать определенную погрешность в описании характера расположения вершин данной группы зерен.

На основании вышеизложенного следует, что для описания распределения вершин алмазных зерен эластичного шлифовального инструмента в зоне контакта с обрабатываемым материалом целесообразно комплексно рассматривать напряженно-деформированное состояние фрагмента «зерно-связка» и характер распределения в статике только наиболее выступающих зерен, которые непосредственно участвуют в процессе резания.

## **2. Основное содержание и результаты работы**

Для оценки погрешности описания распределения вершин наиболее выступающих зерен традиционно используемыми законами распределения высоты выступления зерен, были изготовлены абразивные бруски зернистостью F80 на эластичной полимерной связке. После изготовления бруски подвергались вскрытию путем сошлифовывания слоя  $h=0,5$  мм. Запись рельефа поверхности абразивных брусков проводилась на профилографе-профилометре модели 252. Обработка профилограмм заключалась в определении разновысотности алмазных зерен относительно наиболее выступающего зерна.

Распределение вершин абразивных зерен по высоте было описано следующими законами [3]. Нормальным законом распределения с параметрами: первый центральный момент  $M(x)=31,71$  мкм, второй –  $D(x)=184,96$  мкм<sup>2</sup>. Распределением Вейбулла с параметрами:  $\alpha=2,494$ ;  $\beta=35,75337$ . Гамма-распределением: параметры определены методом моментов  $\alpha=5,42962$ ;  $\beta=5,84071$ . Распределением Рэлея с параметром  $a=28$  мкм. Проверка гипотезы, что опытное распределение подчиняется рассматриваемым законам по критерию согласия  $\chi^2$  (Пирсона), показала, что гипотезу соответствия можно считать правдоподобной для всех рассматриваемых законов.

Аппроксимация значений вероятности распределения вершин зерен ( $y$ ) на глубину ( $x$ ) до 15 мкм от наиболее выступающего зерна показала, что наиболее близко (коэффициент корреляции  $r=0,997$ ) вероятность распределения описывается выражением:

$$y = -2,06828 \cdot (0,41886 - \exp(0,13670 \cdot x)), \quad (1)$$

Сравнение результатов описания распределения вершин зерен по всей глубине рабочей поверхности инструмента традиционными методами и только наиболее выступающих зерен аналитическим выражением показало, что рассмотренные выше законы распределения существенно занижают количество вершин зерен в верхних слоях рабочей поверхности круга (рис. 1).

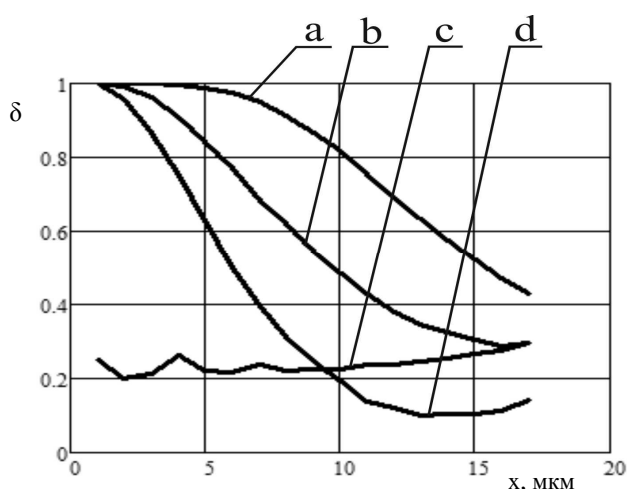


Рис. 1. Относительная погрешность описания разновысотности наиболее выступающих алмазных зерен

На рисунке представлена относительная погрешность « $\delta$ » по глубине рабочего слоя шлифовального инструмента « $x$ ». Наименьшее значение погрешности обеспечивает описание вершин зерен нормальным законом распределения (кривая c). Количество зерен занижено по сравнению с фактическим на (20-25)% практически равномерно по всей рассматриваемой глубине. Распределение Рэлея (кривая d), Вейбулла (кривая b) и гамма-распределение (кривая a) дают существенную погрешность в области наиболее выступающих зерен, приближаясь к значениям

погрешности нормального распределения на глубине РПК (10?16) мкм. Это обусловлено тем, что эти законы описывают распределение существенно положительных величин и в нулевой точке аргумента дают нулевое значение функции, а фактически на нулевом уровне расположена вершина наиболее выступающего зерна.

Таким образом, законы, традиционно используемые для описания распределения вершин зерен по глубине рабочего слоя шлифовального инструмента, охватывая все зерна по глубине рабочего слоя, дают значительную погрешность описания распределения вершин зерен, непосредственно принимающих участие в процессе резания. Аппроксимация распределения вершин наиболее выступающих зерен (в пределах глубины резания) дает более корректный результат.

Для описания характера распределения вершин режущих зерен в зоне контакта с обрабатываемым материалом необходимо знать закономерности поведения алмазного зерна, закрепленного в упругом основании, под нагрузкой. Для решения этой задачи обычно применяют численные методы в частности, метод конечных элементов.

Сила варьировалась в пределах усилий, действующие на алмазное зерно на операциях тонкого шлифования и предварительного полирования природного камня. Расчеты показали, что величина перемещения алмазного зерна в эластичной связке линейно увеличивается с ростом нагрузки и уменьшается по гиперболической зависимости с увеличением модуля упругости связки. Глубина относительной заделки зерна оказывает на его перемещение незначительное влияние

Для расчета шероховатости обработанной поверхности или производительности обработки более удобно оперировать понятием обобщенной податливости связки  $\Omega$ , определив его как отношение величины погружения зерна в связку  $\Delta Y$  к нормальной силе  $P$ .

Шлифование инструментом на эластичных связках осуществляется по упругой схеме, т.е задавая требуемое усилие прижима шлифовального круга к заготовке. В частности, на операциях тонкого шлифования мрамора необходимо обеспечить давление прижима в пределах  $p=(0,05?0,07)$  МПа [4]. При установившемся равновесном состоянии это усилие распределяется по алмазным зернам

пропорционально величине их упругого погружения в связку, а, следовательно, пропорционально величине их выступания над уровнем связки.

Поэтому процесс внедрения алмазных зерен в обрабатываемый материал схематизируем следующим образом: на первом этапе полагаем, что алмазное зерно погружается в связку, но не внедряется в обрабатываемый материал. Заглубление зерен в обрабатываемый материал происходит после того, как давление в зоне контакта достигнет заданного значения.

Графически данные условия проиллюстрированы на рис. 2. Литерой а показано исходное положение алмазных зерен, b - перемещение зерна в связке, с - внедрение зерна в обрабатываемый материал.

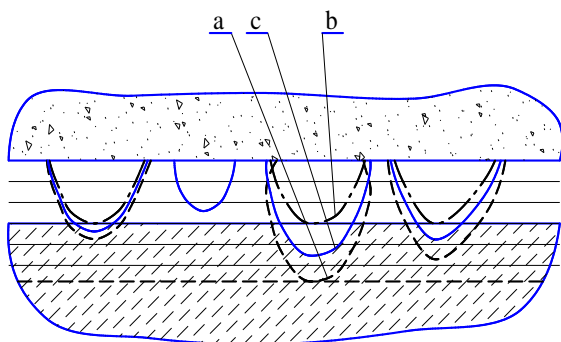


Рис. 2. Схематизация внедрения алмазного зерна в обрабатываемый материал

Методика расчета величины контактных усилий заключается в следующем. Поверхностный слой шлифовального круга делим на интервалы, приняв допущение, что все расположенные в пределах данного интервала вершины зерен имеют одинаковую высоту, равную верхней границе интервала. Приведенные выше результаты аппроксимации вероятности распределения вершин наиболее выступающих зерен показали, что зерна в поверхностном слое алмазного круга распределены по закону, близкому к экспоненциальному, формула (1). Поэтому

по мере сближения поверхности инструмента и заготовки все большее их число будет участвовать в контакте. При этом происходит непрерывное перераспределение нормальной силы резания между отдельными зернами и, как следствие, изменение удельных усилий в зоне контакта. Для инструментов с различными упругими характеристиками связки количество контактирующих зерен будет разное, соответственно будут изменяться силовые параметры в зоне контакта. Определение удельного количества алмазных зерен на рабочей поверхности шлифовального инструмента на эластичной связке приведено в [5].

При сближении поверхности инструмента и детали усилие на контактирующих зернах описывается выражением:

$$F = \frac{[g - (i - 1)] \cdot \Delta}{\Omega}, \quad (2)$$

где  $g \cdot \Delta$  - величина сближения шлифовального инструмента и обрабатываемой поверхности, выраженная в интервалах условного деления поверхностного слоя круга:  $g$  - количество интервалов,  $\Delta$  - ширина интервала, мм.

$\Omega$  - обобщенная податливость связки, м<sup>3</sup>/N.

$i$  - номер интервала, в котором расположены данные зерна (расчет от интервала, в котором расположены наиболее выступающие зерна).

При склерометрических исследованиях различных хрупких неметаллических материалов (оптическое стекло, кристаллы, мрамор) показано, что упруго-пластическая деформация данных материалов наблюдается при усилиях на инденторе  $F \leq (0,15-0,3)$  N в

зависимости от характеристик материала. При данных условиях глубина царапины прямо пропорционально зависит от усилия на инденторе и уменьшается с увеличением микротвердости обрабатываемого материала.

Тогда величина заглупления алмазного зерна, расположенного в  $i$ -м интервале, в обрабатываемый материал будет равна:

$$h_{iy} = c \cdot \left( \frac{[g - (i - 1)] \cdot \Delta}{\Omega} \right), \quad (3)$$

где  $c$  - коэффициент, получаемый эмпирическим путем; зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала и характеристики алмазного зерна.

Изменение положения вершины абразивного зерна, лежащего в  $i$ -м интервале относительно ненагруженного состояния будет:

$$h_i = [g - (i - 1)] \cdot \Delta \cdot \left( 1 - \frac{c}{\Omega} \right), \quad (4)$$

В результате происходит перераспределение расположения вершин алмазных зерен по высоте в зоне контакта с обрабатываемым материалом.

Расчеты, проведенные с использованием формул (3) и (4) показали, что величина слоя, в котором расположены вершины алмазных зерен, изменивших свое положение в зоне контакта с обрабатываемым материалом, зависит, главным образом, от податливости связки.

Графическая иллюстрация распределения по высоте вершин алмазных зерен для шлифовального круга зернистостью F80 при шлифовании изделий из мрамора для

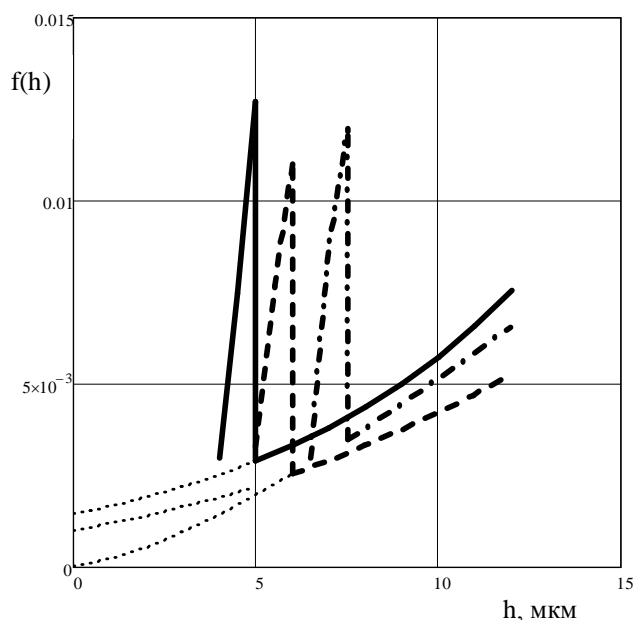


Рис. 3. Плотность распределения вершин зерен в зоне контакта с обрабатываемым материалом

различных способов описания распределения активных зерен представлены на рис. 3.

На графике сплошной линией показана деформация плотности распределения, описанной аппроксимацией разновысотности активных зерен круга, пунктирной – распределение всех выступающих зерен законом Гаусса, штрихпунктирной – законом Вейбулла. Точечной линией показаны начальные значения плотности распределения при описании соответствующими законами распределения вершин зерен в статике.

Анализ полученных зависимостей показывает, что метод описания распределения вершин абразивных зерен существенно влияет на значения распределения зерен в зоне контакта с обрабатываемым материалом. При аппроксимации

распределения вершин активных зерен аналитической зависимостью разновысотность вершин зерен в зоне контакта составляет 1 мкм, при описании распределения вершин зерен законом Гаусса – 1,13 мкм, а при описании законом Вейбулла – 1,44 мкм. Это обусловлено занижением значений плотности распределения вершин зерен при описании всей совокупности зерен методами математической статистики. Соответственно, при расчете параметров шероховатости поверхности, получаемой на операциях тонкого шлифования, для получения корректных результатов, целесообразно использовать аналитическое описание распределения вершин только активных зерен.

### **3. Заключение**

Таким образом, выполненные исследования позволили установить следующее:

1. При обработке эластичным шлифовальным инструментом существенную роль на формирование микрорельефа обработанной поверхности оказывает характер распределения вершин активных режущих зерен по высоте рабочего слоя инструмента.

2. Проведенные исследования показали, что описание разновысотности вершин зерен по всей глубине рабочей поверхности алмазных кругов с помощью традиционно используемых для этой цели законов распределения дает существенную, до 1,5 раз, погрешность определения количества наиболее выступающих, активных режущих зерен шлифовального круга.

3. Установлено, что зависимость перемещения вершины алмазного зерна в упругой матрице эластичного шлифовального инструмента под действием сил резания в рассматриваемом диапазоне усилий носит линейный характер, а зависимость величины перемещения от величины упругости связки описывается гиперболической зависимостью.

4. При расчете параметров шероховатости поверхности, получаемой на операциях тонкого шлифования эластичным инструментом, для получения корректных результатов, целесообразно использовать аналитическое описание распределения вершин только активных зерен.

### **Список литературы**

1. Щеголев В.А. Уланова М.Е. Эластичные абразивные и алмазные инструменты, : Машиностроение, Ленинград, 1977. – 180 с.

2. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке: Севастополь, 2012. – 304 с. ISBN 978–617–612–051-3.

3. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика, ФИЗМАТЛИТ, Москва, 2006. – 816 с. – ISBN 5-9221-0707-0.

4. Танович Л.М. Попович Л.Д. Специфика процесса резания мрамора PERLATO // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» : Серія Машинобудування, 2010. - № 59. - С. 69-71.

5. Байков А.В., Михайлов А.Н., Феник Л.Н., Билищук К.А. Параметры рабочей поверхности эластичного шлифовального инструмента с ориентированным расположением режущих зерен // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний сб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. Вип. 41. – 373 с. ISSN 2073-3216.

Поступила в редколлегию 04.05.2015г.