

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL AND  
PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING**

Научная статья

УДК 621.921 : 621.922

DOI: 10.26730/1999-4125-2023-4-26-35

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ЗЕРЕН**

**Шатько Дмитрий Борисович,  
Люкшин Владимир Сергеевич**

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

\*для корреспонденции: shdb.tm@kuzstu.ru



**Информация о статье**

Поступила:

20 июня 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 сентября 2023 г.

Принята к публикации:

20 сентября 2023 г.

Опубликована:

27 сентября 2023 г.

**Ключевые слова:**

Разрушение материалов,  
прочность, ударная  
прочность, форма зерна,  
ориентация зерна,  
распределение напряжений,  
внутреннее напряжение

**Аннотация.**

Представленное исследование посвящено изучению прочностных характеристик единичных шлифовальных зерен различной формы. Абразивным материалам присуще хрупкое разрушение в процессе резания. Данное разрушение крайне нестабильно и его теоретическое описание, учитывающее многие факторы, весьма затруднено. В то же время прочность абразивных зерен является одним из важнейших параметров, влияющих на эксплуатационные характеристики шлифовальных инструментов. Поэтому работа, направленная на всестороннее изучение процесса разрушения единичных абразивов различных марок, формы и ориентации, имеет большую актуальность. Подобного рода исследование позволит оптимальным образом подобрать абразивы для изготовления шлифовальных инструментов под конкретные условия работы.

Целью работы является получение и анализ картины напряжений, возникающих в шлифовальных зернах при различных схемах приложения к ним нагрузки.

В качестве методики исследования применялись средства математического моделирования, в частности использован метод конечных элементов с привлечением программного обеспечения «MSC/NASTRAN». Кроме этого, прочность зерен оценивалась и экспериментальными методами одноосного сжатия, а также при помощи качающегося груза, что позволило дать объективную картину процесса.

Приведены результаты статических прочностных испытаний зерен нормального электрокорунда методом одноосного сжатия, а также данные изучения влияния ориентации и формы шлифовального зерна на его ударную прочность.

**Для цитирования:** Шатько Д.Б., Люкшин В.С. Исследование прочности шлифовальных зерен // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 4 (158). С. 26-35. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-4-26-35, EDN: PNMRIС

## **Введение**

Прогрессивные методы обработки материалов резанием ориентированы одновременно на повышение и качества, и производительности процесса. К числу таких методов можно отнести абразивную обработку инновационными шлифовальными инструментами, изготовленными с применением классифицированных по форме и ориентации абразивных зерен. Исследованию физико-механических характеристик абразивных материалов и инструментов посвящено большое количество работ, в которых обозначено влияние этих параметров на конечные показатели процесса шлифования [1-4]. Сложность подобных исследований обуславливается тем фактом, что шлифовальные инструменты изготавливаются из стандартной абразивной массы, включающей зерна, значительно отличающиеся друг от друга по форме. Ключевые характеристики зерен, такие как прочность и режущая способность, тоже будут весьма различны в зависимости от признака формы. В свою очередь, ряд исследований доказывают важность учета этих характеристик при изготовлении новых конструкций абразивных инструментов [3, 5-7].

Как известно, процесс шлифования характеризуется снятием огромного количества тонких стружек. При этом в работе принимает участие большое число абразивных зерен. Помимо указанных обстоятельств сложность изучения особенностей процесса шлифования заключается в том, что снятие стружки происходит в исключительно малый период времени. Вследствие этого характеристики процесса резания при шлифовании, как правило, оценивают косвенными методами, среди которых изучение свойств единичных шлифовальных зерен. Большую перспективу имеют исследования с привлечением средств компьютерного моделирования [8, 9].

Процессу хрупкого разрушения абразивных материалов характерна нестабильность, поэтому его теоретическое описание вызывает определенные сложности. Существующие теории разрушения базируются на эмпирических данных и позволяют с определенной точностью оценить прочность хрупких материалов, не учитывая при этом размеры, форму, внутренние и внешние дефекты. Данные свойства в полной мере присущи абразивным зернам, поэтому при изучении их прочностных характеристик целесообразен не теоретический подход, а экспериментальный.

Работы по исследованию прочности и стойкости абразивных зерен достаточно разносторонни по своему содержанию. Одни авторы предлагают свои оригинальные методики определения механической прочности, другие определяют прочность закрепления абразивных зерен в шлифовальном круге, третьи акцентируют внимание на контроле качества шлифматериалов по разрушаемости, четвертые описывают механизм износа абразивного зерна с позиций кинетической теории прочности [10-16].

В настоящее время для изучения прочности шлифовальных зерен используют следующие подходы [3]:

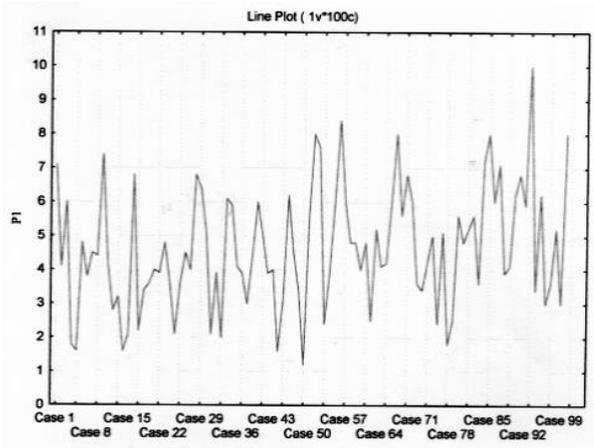
- измельчение зерна в шаровой мельнице;
- разрушение зерна методом одноосного сжатия;
- микрорезание единичным шлифовальным зерном;
- разрушение зерен специальным бойком, качающимся грузом и грузом, падающим с определенной высоты.

Вышеперечисленным методам присущи определенные недостатки, связанные с тем, что данные схемы не в полной мере отражают схемы нагружения, характерные реальным условиям шлифования. В целях обеспечения максимальной достоверности при определении прочности абразивных зерен необходимо стремиться воспроизводить реальные условия их нагружения.

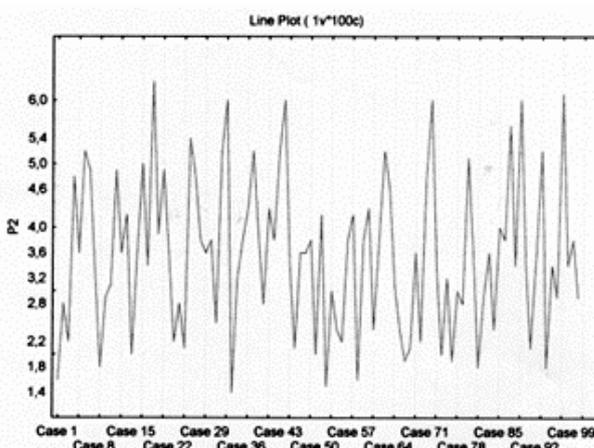
Анализируя относительные подходы к оценке прочности, можно сделать вывод, что они не дают полноценной картины поведения зерна в процессе резания. В этой связи целесообразно использовать те методики, которые максимально приближены к реальным условиям работы зерен. Метод одноосного сжатия по совокупности признаков выглядит наиболее предпочтительным для изучения прочностных характеристик шлифовальных зерен в статическом состоянии. Что же касается динамических испытаний, то здесь наиболее приемлем метод оценки прочности качающимся грузом.

## **Методика исследования**

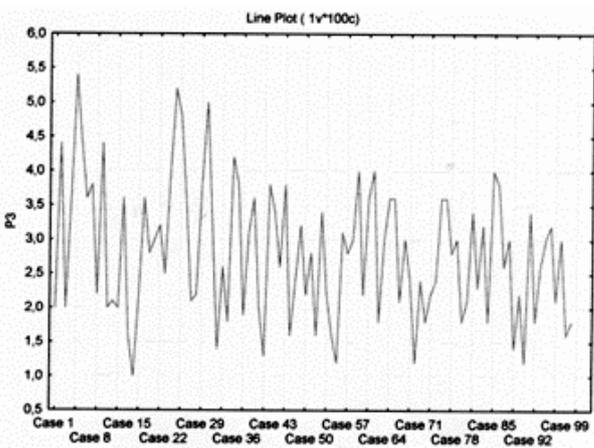
*Оценка прочности зерен экспериментальным методом одноосного сжатия.* Данный метод на практике реализовывался при помощи лабораторной установки, принцип действия которой



a)



б)



в)

Рис. 1. Усилия разрушения зерен различной формы:  
 а) изометрической; б) промежуточной; в) игольчатой  
 Fig. 1. The forces of destruction of grains of various shapes:  
 a) isometric; b) intermediate; c) needle

базируется на перемещении штока посредством гидропривода. Исследуемое зерно прижимается к твердосплавной пластинке силоизмерительного блока. Усилие разрушения зерна фиксируется механическим стрелочным силоизмерителем.

На описанной выше установке проведены эксперименты по исследованию прочности зерен нормального электрокорунда 13A40. Использовались шлифовальные зерна различной формы: изометрической, промежуточной и игольчатой.

Поскольку для абразивных зерен при разрушении характерен большой разброс экспериментальных данных, для повышения достоверности использовались многократные повторения испытаний – свыше ста раз при исследовании каждой из форм зерен.

Для проведения испытаний в качестве образцов использовались пластинки с перпендикулярно закрепленными на них абразивными зёрнами. При таком закреплении осевая сила при нагружении действует по направлению большей оси зерна.

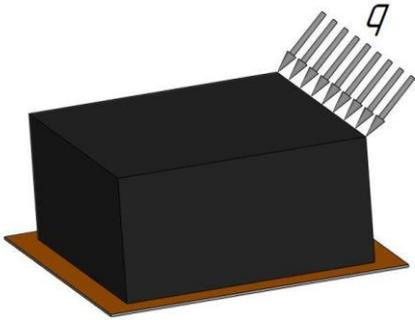
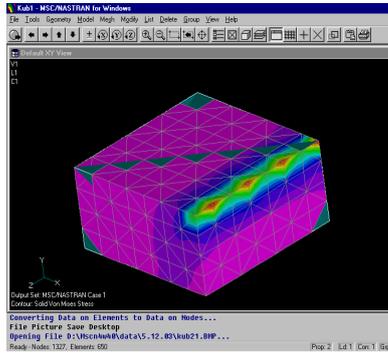
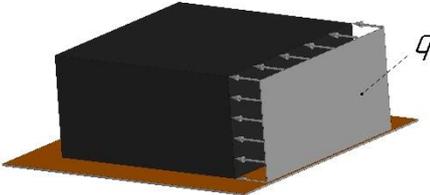
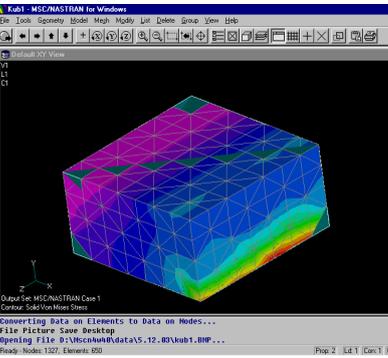
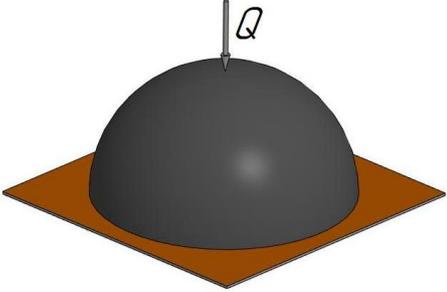
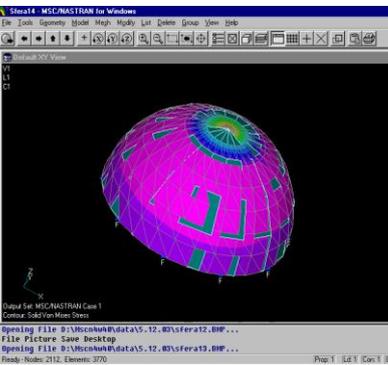
При обработке полученных экспериментальных данных применялся программный пакет «STATISTICA 6.0». На Рис. 1 представлены некоторые данные усилий разрушения  $P$  ( $\text{kH} \cdot 10^{-2}$ ) по итогам 100 измерений шлифовальных зерен 13A40 (нормальный электрокорунд) различной формы.

*Оценка прочности шлифовальных зерен экспериментальным методом при помощи качающегося груза.*

Поскольку шлифовальное зерно работает с циклически повторяющимися кратковременными нагрузками,

методики, базирующиеся на динамических условиях нагружения, позволяют наилучшим образом воспроизвести реальную картину нагружения. К такому подходу относится оценка прочности при помощи качающегося груза. Данный подход предназначен для определения ударной прочности единичного абразивного зерна.

Таблица 1. Нормальные напряжения в моделях шлифовальных зерен  
Table 1. Normal stresses in models of grinding grains

	<i>Схемы нагружения</i>	<i>Картинки нормальных напряжений</i>
1		
2		
3		

Суть данного подхода заключается в следующем. Испытуемое зерно закрепляется в обойме. Под действием силы тяжести маятник с бойком движется вниз, и в нижней точке боек разрушает шлифовальное зерно, после чего маятник продолжает движение, отклоняясь при этом относительно вертикальной оси на определенный угол, который замеряется по специальной шкале. Полученное значение угла отклонения позволяет судить об ударной прочности испытуемого шлифовального зерна.

При испытаниях на прочность применялись шлифовальные зерна марки 13А (нормальный электрокорунд) зернистостью № 125, №100, №80. Помимо отечественных абразивов использовался немецкий нормальный электрокорунд NK F24 зернистостью №80. Зерна были предварительно классифицированы по признаку формы на 3 разновидности: изометрическую, промежуточную и пластинчатую.

Относительно горизонтали был принят угол наклона зерна ( $\gamma$ ) в следующих пределах:  $90^\circ$ ,  $75^\circ$  и  $60^\circ$  (в направлении удара). Это дало возможность изучить прочностные характеристики зерна с различной ориентацией.

Ударная прочность зерна определяется по формуле:

$$a = \frac{U}{S}, \quad (1)$$

где  $U$  – импульс силы;

$S$  – площадь поверхности шлифовального зерна в зоне излома.

Площадь поверхности излома зерна определялась при помощи сканера и специального программного обеспечения. Для обеспечения достоверности экспериментальных данных каждый опыт повторялся не менее 25 раз.

*Теоретический метод исследования напряжений в моделях зерен методом конечных элементов.*

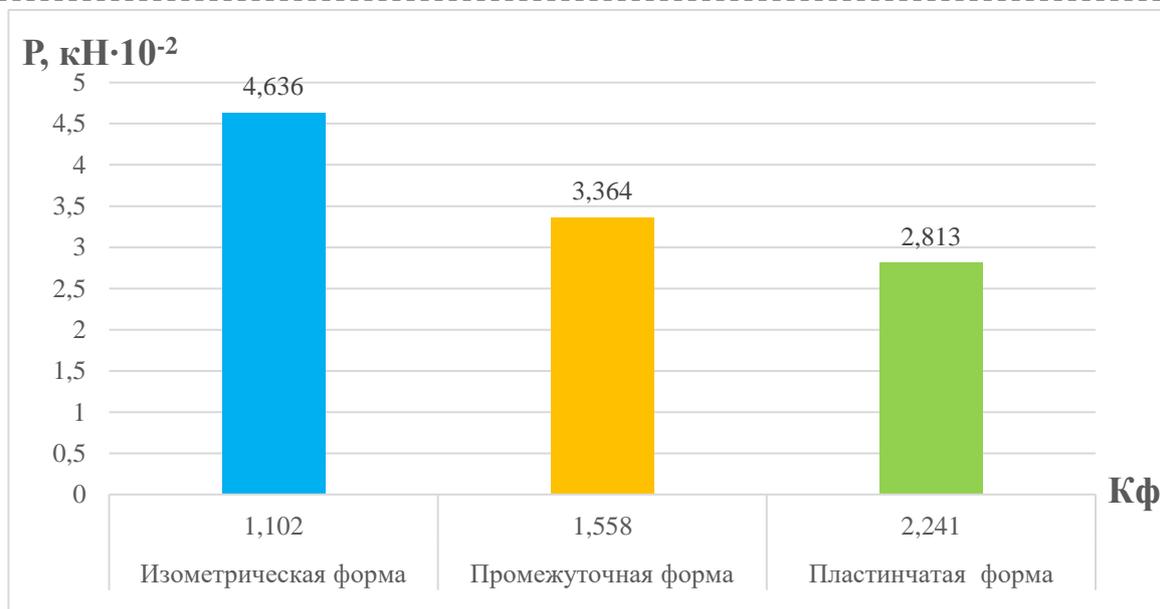
При исследовании влияния формы зерна и характера приложения нагрузки на распределение напряжений в теле шлифовального зерна использовалось программное обеспечение «MSC/NASTRAN». Для исследований применялись модели шлифовальных зерен в форме куба, пластины и сферы. В таблице 1 представлены некоторые схемы нагружения, наиболее характерные для реального процесса шлифования. Также продемонстрированы картины нормальных напряжений, возникающих в моделях зерен.

### Результаты и обсуждение

*Оценка прочности зерен экспериментальным методом одноосного сжатия.*

Анализ полученных экспериментальным путем зависимостей позволяет подтвердить результаты математического моделирования в том, что прочностные характеристики абразивных зерен зависят от их формы. Так, полученные экспериментальные данные позволяют утверждать, что в среднем усилии разрушения изометрических зерен в 1,3 раза выше, чем у промежуточных и в 1,64 раза – чем у игольчатых зерен (см. Рис. 2).

Полученные данные позволяют предположить, что применение изометрических зерен в структуре шлифовального инструмента будет способствовать повышению прочности



*Рис. 2. Усилие разрушения шлифовальных зерен 13A40 (нормальный электрокорунд) в зависимости от коэффициента формы*

*Fig. 2. The force of destruction of grinding grains 13A40 (normal electrocorundum) depending on the form factor*

микрорежущих элементов. Отмечено, что чем больше коэффициент формы зерен игольчатой и промежуточной форм, тем их прочность ниже. Данное различие в прочности, очевидно, должно также повлиять и на другие эксплуатационные показатели зерна и инструментов, изготовленных из них.

Оценка прочности шлифовальных зерен экспериментальным методом при помощи качающегося груза.

Полученные результаты экспериментов (Рис. 3) показывают, что более прочными являются изометрические зерна по сравнению с промежуточными и игольчатыми (пластинчатыми).

Отмечено, что при изменении угла наклона зерна от  $90^\circ$  до  $60^\circ$  (в направлении удара) прочность зерен повышается на:

- $7 \div 18\%$  – при использовании абразива 13A125;
- $10 \div 16\%$  – при использовании абразива 13A100;
- $7 \div 18\%$  – при использовании абразива 13A80;
- $5 \div 17\%$  – при использовании абразива NK F24.

Помимо формы и ориентации шлифовальных зерен на их прочность также существенно влияют их размеры и марка абразива.

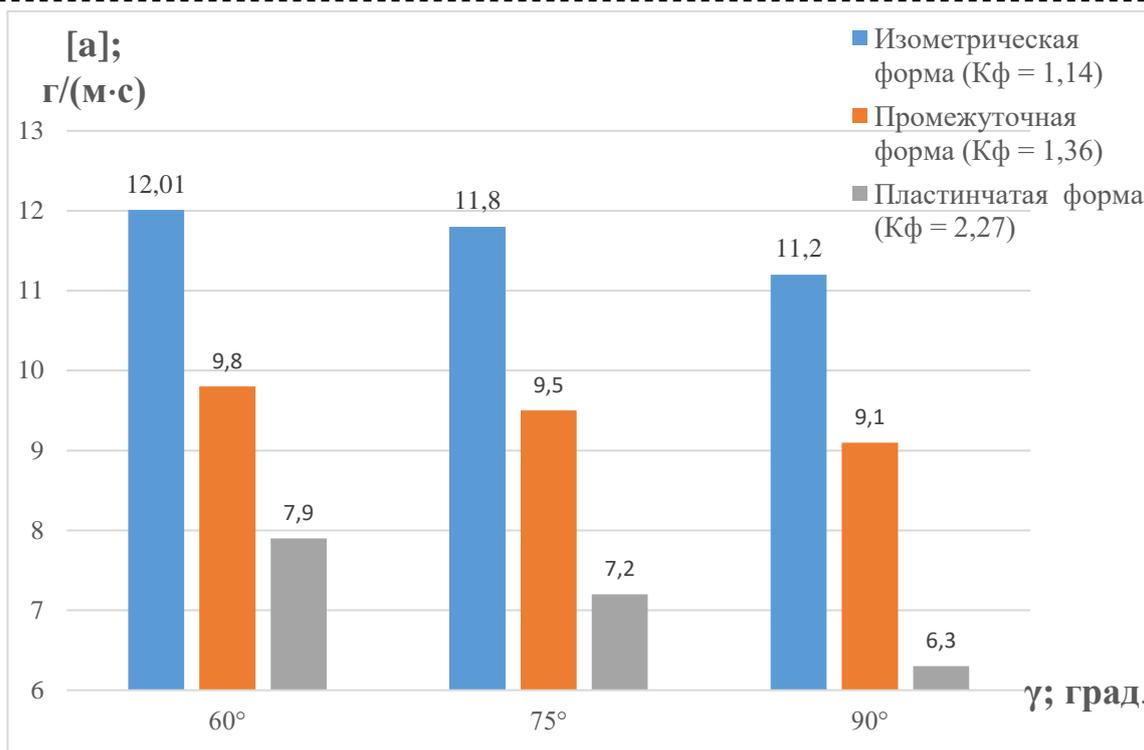


Рис. 3. Ударная прочность шлифовальных зерен 13A125 в зависимости от их формы и ориентации  
Fig. 3. Impact strength of grinding grains 13A125 depending on their shape and orientation

Таблица 2. Параметры статистических моделей

Table 2. Parameters of statistical models

Марка абразивного материала	Члены модели	Коэффициенты статистической модели
13A125	$a_0$	3,802989
	$\ln K_\phi$	-0,752999
	$\ln \gamma$	- 0,290076

Полученный массив экспериментальных данных обрабатывался при помощи программы «STATISTICA 6.0». При этом была изучена взаимосвязь между ударной прочностью единичного зерна и его формой и ориентацией:

$$\ln a = a_0 + a_1 \cdot \ln K_\phi + a_2 \cdot \ln \gamma \quad (2)$$

Параметры статистической модели прочности шлифовального зерна, учитывающей марку, ориентацию, размер и форму, представлены ниже в Таблице 2, где:

$a_0$  – свободный член модели;

$K_\phi$  – коэффициент формы шлифовального зерна;

$\gamma$  – угол ориентации шлифовального зерна.

Анализ приведенных моделей показывает, что с уменьшением размера зерна влияние формы на его ударную прочность также снижается. Прочностные характеристики существенно не зависят от размера исследуемого зерна.

*Теоретический метод изучения напряжений в моделях зерен методом конечных элементов.*

Из приведенных в Таблице 1 данных видно, что способ нагрузки и форма зерна оказывают влияние на величину возникающих в нем нормальных напряжений и, соответственно, на его прочность.

Зерна, воспринимающие нагрузку заостренными участками, характеризуются наибольшими напряжениями рядом с вершинами, что на практике приводит к откалыванию небольших частиц (схема 1).

Зерна с нагрузкой преимущественно на плоские участки характеризуются наибольшими напряжениями непосредственно рядом с местом их заделки в связку, что приводит к их выламыванию из связки (схема 2).

Для схемы 3 характерно точечное приложение нагрузки. Здесь может наблюдаться как вырыв зерна из связки, так и его разрушение.

### **Выводы**

Средства математического моделирования показали, что форма абразивного зерна и способ приложения к нему нагрузки существенно влияют на возникающие в нем напряжения.

Статические и динамические испытания подтверждают гипотезу о том, что параметры формы и ориентации шлифовальных зерен оказывают весомое влияние на их прочность. Отмечено, что более прочными являются изометрические зерна по сравнению с промежуточными и игольчатыми (пластинчатыми).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Еремеев П. Д. О методике оценки физико-механических характеристик абразивных материалов для инструмента, применяемого при обдирочном шлифовании // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. № 28(47). С. 220–224.
2. Переладов А. Б. Исследование показателей процесса абразивной обработки с использованием 3-хмерной компьютерной модели // Технология машиностроения. 2018. № 6. С. 46–52.
3. Коротков А. Н. Эксплуатационные свойства абразивных материалов. Монография. Изд-во Краснояр. ун-та, 1992. 122 с.
4. Попов А. В. Влияние прочности алмазных зерен на режущую способность и относительный расход алмазов шлифовальных кругов // СТИН. 2011. № 5. С. 12–15.
5. Lyukshin V. S., Shatko D. B., Strelnikov P. A. Study of performance criteria of experimental tumbling bodies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, 16–18 april 2020. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk : Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 32036. DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032036.
6. Lyukshin V., Shatko D., Strelnikov P. Improving efficiency of tumbling by using tumbling media of a new design // Materials Today: Proceedings : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019, Sevastopol, 09–13 september 2019. Sevastopol : Elsevier Ltd, 2019. P. 1957–1960. DOI 10.1016/j.matpr.2019.07.050.
7. Shatko D. B., Lyukshin V. S., Strelnikov P. A. Improvement of abrasive machining performance in mining machinery manufacturing based on the use of innovative structures of tumbling bodies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia, 31 July 2020. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk : Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 22020. DOI 10.1088/1757-899X/919/2/022020.
8. Зубарев Ю. М., Приемьшев А. В. Моделирование процесса шлифования микрорезанием единичными абразивными зёрнами. Ч. 1. Определение прочности абразивных зерен // Справочник. Инженерный журнал. 2020. № 11(284). С. 13–17. DOI 10.14489/hb.2020.11.pp.013-017.
9. Пушкарев О. И., Бражников Д. Б. Феноменологическая модель разрушения абразивных зерен при безалмазной обработке шлифовальных кругов // Внутривузовская научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава : Сборник статей, Волжский, 28–30 ноября 2013 года. Волжский : Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2013. С. 50–51.
10. Салова Д. П., Носов Н. В., Денисенко А. Ф. [и др.] Определение прочности зерен синтетических алмазов и эльбора, выделенных из шлифовального шлама // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 4. С. 73–76.
11. Пушкарев О. И., Шумячер В. М., Скопинцев С. В. Определение прочности абразивных зерен

шлифовальных материалов // Огнеупоры и техн. керамика: Международный журнал. 2005. № 8. С. 42–43.

12. Дуличенко И. В., Кудрявцева Н. Н., Орлова Т. Н. Методика определения механической прочности // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Сборник статей Международной научно-технической конференции, Волгоград-Волжский, 30-31 января 2011 года; под ред. Шумячер В. М. Волгоград-Волжский: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2012. С. 23-26.

13. Богущий Б. В., Братан С. М. Определение прочности закрепления абразивных зерен в шлифовальном круге // Молодежный научный форум: технические и математические науки. 2016. № 8(37). С. 4–8.

14. Пушкарев О. И., Шумячер В. М. Контроль качества шлифматериалов по разрушаемости // Абразивное производство: сборник научных трудов. Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет). Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2004. С. 135–142.

15. Ардашев Д. В. Описание механизма износа абразивного зерна с позиций кинетической теории прочности // Наука ЮУрГУ : Материалы 66-й научной конференции (Электронный ресурс), Челябинск, 15–17 апреля 2014 года. Ответственный за выпуск: Ваулин С. Д. Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2014. С. 367–375.

16. Ардашев Д. В. Кинетическая трактовка стойкости абразивного зерна // Металлообработка. 2013. № 3(75). С. 10–19.

© 2023 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Шатько Дмитрий Борисович, канд. техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: shdb.tm@kuzstu.ru

Люкшин Владимир Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: lwsfoa@rambler.ru

Заявленный вклад авторов:

Шатько Дмитрий Борисович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Люкшин Владимир Сергеевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

### STUDY OF THE STRENGTH OF GRINDING GRAINS

Dmitry B. Shatko,  
Vladimir S. Lyukshin

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

\*for correspondence: maxsdss@mail.ru



#### Article info

Received:

20 June 2023

Accepted for publication:

15 September 2023

#### Abstract.

The presented study is devoted to the study of the strength characteristics of individual grinding grains of various shapes. Abrasive materials have inherently brittle fracture during the cutting process. This destruction is extremely unstable and its theoretical description, taking into account many factors, is very difficult. At the same time, the strength of abrasive grains is one of the most important parameters affecting the performance of grinding tools. Therefore, the work aimed at a comprehensive study of the process of

Accepted:  
20 September 2023

Published:  
27 September 2023

**Keywords:** Rupture of materials, strength, impact strength, grain shape, grain orientation, stress distribution, internal stress

*destruction of single abrasives of various grades, shapes and orientations is of great relevance. This kind of study will allow you to optimally select abrasives for the manufacture of grinding tools for specific working conditions.*

*The aim of the work is to obtain and analyze the pattern of stresses that arise in grinding grains under various schemes for applying loads to them.*

*As a research methodology, mathematical modeling tools were used, in particular, the finite element method was used with the involvement of the "MSC / NASTRAN" software. In addition, the strength of the grains was also evaluated by experimental methods of uniaxial compression, as well as using a swinging load, which made it possible to give an objective picture of the process.*

*The results of static strength tests of grains of normal electrocorundum by the method of uniaxial compression, as well as data on the influence of the orientation and shape of the grinding grain on its impact strength, are presented.*

**For citation:** Shatko D.B., Lyukshin V.S. Study of the strength of grinding grains. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023; 4(158):26-35. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2023-4-26-35, EDN: PNMRI

## REFERENCES

1. Eremeev P.D. O metodike otsenki fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik abra-zivnykh materialov dlya instrumenta, primenyayemogo pri obdirochnom shlifovanii [On the methodology for assessing the physical and mechanical characteristics of abrasive materials for tools used in rough grinding]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura. [ Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture ]*. 2012; 28(47):220–224.
2. Pereladov A.B. Issledovaniye pokazateley protsessa abrazivnoy obrabotki s ispol'zovaniyem 3-khmernoy komp'yuternoy modeli [Study of indicators of the process of abrasive processing using a 3-dimensional computer model]. *Tekhnologiya ma-shinostroyeniya. [Technology of mechanical engineering]*. 2018; 6:46–52.
3. Korotkov A.N. Ekspluatatsionnyye svoystva abrazivnykh materialov [Operational properties of abrasive materials]. Izdatel'stvo krasnoyarskogo universiteta. [Krasnoyarsk Uni-versity Press]. 1992. 122 p.
4. Popov A.V. Vliyaniye prochnosti almaznykh zeren na rezhushchuyu sposobnost' i odnositel'nyy rashkod almazov shlifoval'nykh krugov [Influence of the strength of diamond grains on the cutting ability and relative consumption of diamonds in grinding wheels]. *STIN. [STIN]*. 2011; 5:12–15.
5. Lyukshin V.S. [et al.] Issledovaniye ekspluatatsionnykh pokazateley eksperimental'nykh galtovochnykh tel [Study of performance criteria of experimental tumbling bodies]. Institut fiziki i IOP Publishing Limited. [Institute of Physics and IOP Publishing Limited]. 2020. P. 32036. DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032036.
6. Lyukshin V. [et al.] Povysheniye effektivnosti operatsii galtovki za schet ispol'zovaniya galtovochnykh tel novoy konstruktssii [Improving efficiency of tumbling by using tumbling media of a new design]. *El'zevir. [Elsevier Ltd]*. 2019. Pp. 1957–1960. DOI 10.1016/j.matpr.2019.07.050.
7. Shatko D.B. [et al.] Povysheniye effektivnosti protsessa abrazivnoy obrabotki v uslovi-yakh gornogo mashinostroyeniya na osnove ispol'zovaniya innovatsionnykh konstruktssiy galtovochnykh tel [Improvement of abrasive machining performance in mining machinery manufacturing based on the use of innovative structures of tumbling bodies]. Institut fiziki i IOP Publishing Limited. [Institute of Physics and IOP Publishing Limited]. 2020. P. 22020. DOI 10.1088/1757-899X/919/2/022020.
8. Zubarev Yu.M., Pryemyshev A.V. Modelirovaniye protsessa shlifovaniya mikrorezaniyem yedinichnymi abrazivnymi zernami. Ch. 1. Opredeleniye prochnosti abrazivnykh zeren [Simulation of the process of grinding by microcutting with single abrasive grains. Part 1. Determination of the strength of abrasive grains]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. [Handbook. Engineering Journal]*. 2020; 11(284):13–17. DOI 10.14489/hb.2020.11.pp.013-017.
9. Pushkarev O.I., Brazhnikov D.B. Fenomenologicheskaya model' razrusheniya abrazivnykh zeren pri bezalmaznoy obrabotke shlifoval'nykh krugov [Phenomenological model of the destruction of abrasive grains during diamond-free processing of grinding wheels]. *Volgogradskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet. [Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering]*. 2013. Pp. 50–51.
10. Salova D.P., Nosov N.V., Denisenko A.F. [et al.]. Opredeleniye prochnosti zeren sinteticheskikh almazov i el'bora, vydelennykh iz shlifoval'nogo shlama [Determination of the strength of grains of synthetic diamonds and elbor isolated from grinding sludge]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya. [Scientific and technical bulletin of the Volga region]*. 2019; 4:73–76.
11. Pushkarev O.I., Shumyacher V.M., Skopintsev S.V. Opredeleniye prochnosti abrazivnykh zeren shlifoval'nykh materialov [Determination of the strength of abrasive grains of grinding materials]. *Ogneupory i tekhn. keramika: Mezhdunarodnyy zhurnal. [Refractories and tech. Ceramics: International Journal]*. 2005; 8:42–43.

12. Dulichenko I.V. [et al.] Metodika opredeleniya mekhanicheskoy prochnosti [Method for determining the mechanical strength]. *Volgogradskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet [Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering]*. 2012. Pp. 23–26.

13. Bogutsky B.V., Bratan S.M. Opredeleniye prochnosti zakrepleniya abrazivnykh zeren v shli-foval'nom krugе [Determination of the strength of fixing abrasive grains in a grinding wheel]. *Molodezhnyy nauchnyy forum: tekhnicheskiye i matematicheskiye nauki. [Youth scientific forum: technical and mathematical sciences]*. 2016; 8(37):4–8.

14. Pushkarev O.I., Shumyacher V.B. Kontrol' kachestva shlifmaterialov po razrushayemosti [Quality control of grinding materials by destructibility]. Izdatel'skiy tsentr YUUrGU. [Publishing Center of SUSU]. 2004. Pp. 135–142.

15. Ardashev D.V. Opisanie mekhanizma iznosa abrazivnogo zerna s pozitsiy kine-ticheskoy teorii prochnosti [Description of the abrasive grain wear mechanism from the standpoint of the kinetic theory of strength]. Izdatel'skiy tsentr YUUrGU. [Publishing Center of SUSU]. 2014. Pp. 367–375.

16. Ardashev D.V. Kineticheskaya traktovka stoykosti abrazivnogo zerna [Kinetic interpretation of abrasive grain durability]. *Metallobrabotka. [Metalworking]*, 2013; 3(75):10–19.

© 2023 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*The authors declare no conflict of interest.*

*About the authors:*

Dmitry B. Shatko, C. Sc. in Engineering, associate professor, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya st., 28), e-mail: shdb.tm@kuzstu.ru

Vladimir S. Lyukshin, C. Sc. in Engineering, associate professor, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya st., 28), e-mail: lwsfoa@rambler.ru

*Contribution of the authors:*

Dmitry B. Shatko – formulation of a research task, scientific experiment, review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, writing a text.

Vladimir S. Lyukshin – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, writing a text.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

