

**МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ**

Научная статья

УДК 621.941

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-131-142

**Абразивный инструмент из сферокорунда для обработки древесины***А.В. Сергеевичев<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [ABC-2274-2020](https://orcid.org/0000-0003-3655-207X),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3655-207X>**В.А. Соколова<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>**И.И. Костюков<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ABC-3176-2020](https://orcid.org/0000-0002-3629-8190),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3629-8190>**А.Е. Михайлова<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ABC-1987-2020](https://orcid.org/0000-0003-0280-7409),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0280-7409>**С.А. Войнаш<sup>3</sup>, инж.; ResearcherID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; 910sav@gmail.com, spb.kostyukov@mail.ru, mikhailovaae@ya.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия, 191186; sokolova\_vika@inbox.ru

<sup>3</sup>ООО «ПРО ФЕРРУМ», ул. 1-я Красноармейская, д. 1, Санкт-Петербург, Россия, 198005; sergey\_voi@mail.ru

Поступила в редакцию 10.09.21 / Одобрена после рецензирования 11.12.21 / Принята к печати 19.12.21

**Аннотация.** Жесткий абразивный инструмент из сферокорунда эффективен для шлифования древесины и древесных материалов. Использование абразивных кругов из сферокорунда позволяет повысить производительность процесса шлифования древесины, а также расширить область применения жесткого абразивного инструмента за счет снижения засаливания инструмента и ликвидации прижогов обработанной поверхности. Для обоснования рациональных условий применения абразивных кругов из сферокорунда необходимо определить зависимости, связывающие поверхностные геометрические параметры круга, которые непосредственно влияют на резание, с регламентированными рецептурой объемными характеристиками: зернистостью, содержанием абразивного зерна и связки. Они позволяют оценить характер и степень влияния инструментальных факторов на расстояние между режущими элементами рабочей поверхности круга из сферокорунда. Расстояние между абразивными зернами на поверхности круга в абсолютном большинстве возможных соотношений объемных характеристик превышает расстояние между стенками абразивного зерна. Наибольшее влияние на поверхностные геометрические параметры оказывает размер абразивных зерен. С его увеличением растут поверхностные геометрические размеры и – очень резко – расстояние между абразивными зернами на поверхности круга. Вторым по степени влияния является координата глубины профиля, она во многом определяет соотноше-

ние расстояний между зернами и между стенками зерна. Относительное содержание зерен и связки в круге оказывает меньшее влияние на поверхностные характеристики, чем размер зерна и глубина профиля. С их повышением происходит незначительное уменьшение расстояния между зернами на поверхности круга, на расстояние между стенками абразивного зерна они не оказывают влияния. При изготовлении абразивного инструмента регламентируются характеристики внутреннего объемного строения – зернистость, содержание зерна и связки. А при шлифовании непосредственное участие в работе принимает периферийная поверхность круга, его рельеф. Для описания рельефа круга из сферокорунда необходимо установить связь объемных характеристик с его поверхностными геометрическими параметрами, которые необходимы для определения всех основных показателей процесса шлифования.

**Ключевые слова:** сферокорунд, абразивные круги из сферокорунда, абразивные зерна, межзерновое пространство, поверхностное внутризерновое пространство, шлифование древесины

*Для цитирования:* Сергеевичев А.В., Соколова В.А., Костюков И.И., Михайлова А.Е., Войнаш С.А. Абразивный инструмент из сферокорунда для обработки древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 131–142. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-131-142>

Original article

## Abrasive Tools Made of Spherical Corundum in Wood Working

*Alexander V. Sergeevich*<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABC-2274-2020](https://orcid.org/0000-0003-3655-207X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3655-207X>

*Viktoriiia A. Sokolova*<sup>2</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

*Ivan I. Kostyukov*<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABC-3176-2020](https://orcid.org/0000-0002-3629-8190), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3629-8190>

*Anna E. Mikhailova*<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABC-1987-2020](https://orcid.org/0000-0003-0280-7409), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0280-7409>

*Sergey A. Voinash*<sup>3</sup>✉, Engineer; ResearcherID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; 910sav@gmail.com, spb.kostyukov@mail.ru, mikhailovaae@ya.ru

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Bol'shaya Morskaya, 18, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation; sokolova\_vika@inbox.ru

<sup>3</sup>ООО «PRO FERRUM», ul. 1-ya Krasnoarmeyskaya, 1, Saint Petersburg, 198005, Russian Federation; sergey\_voi@mail.ru✉

Received on September 10, 2021 / Approved after reviewing on December 11, 2021 / Accepted on December 19, 2021

**Abstract.** In the manufacture of hard abrasive tools for sanding wood and wood-based materials, spherical corundum is an effective material. The use of spherical corundum abrasive wheels makes it possible to increase the productivity of wood sanding, as well as to expand the application area of hard abrasive tools by reducing tool loading and eliminating burns of the treated surface. In order to substantiate the rational conditions of application of abrasive



wheels made of spherical corundum it is necessary to determine the dependences linking the surface geometric parameters of the wheel, which directly influence the cutting, with the volume characteristics regulated by the formulation: grain size, content of abrasive grain and binder. The dependencies allow us to assess the nature and degree of influence of tool factors on the distance between the cutting elements of the operating surface of the spherical corundum wheel. The distance between abrasive grains on the wheel surface exceeds the distance between the walls of the abrasive grain in the vast majority of possible ratios of volume characteristics. The greatest influence on the surface geometric parameters has the size of abrasive grains. As it increases, the surface geometric dimensions grow, with a very sharp increase in the distance between abrasive grains on the wheel surface. The second most influential is the profile depth coordinate, which largely determines the ratio of distances between grains and between the grain walls. The relative grain and binder content in the wheel has less influence on the surface properties than the grain size and profile depth. The distance between grains on the wheel surface decreases slightly with their increase; they have no effect on the distance between the abrasive grain walls. The characteristics of the internal volumetric structure (grain size, grain content and binder content) are regulated in the production of abrasive tools. The peripheral surface of the wheel (its relief) is directly involved in the sanding process. For describing the relief of a spherical corundum wheel, it is necessary to determine the relationship between the volume characteristics and its surface geometric parameters, which are necessary to determine all the main parameters of the sanding process. **Keywords:** spherical corundum, spherical corundum abrasive wheels, abrasive grains, intragrain space, surface intragrain space, wood sanding

**For citation:** Sergeevichev A.V., Sokolova V.A., Kostyukov I.I., Mikhailova A.E., Voinash S.A. Abrasive Tools Made of Spherical Corundum in Wood Working. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 131–142. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-131-142>

### *Введение*

В механической технологии древесины большой объем работ приходится на операции шлифования, являющиеся заключительными перед отделкой и склеиванием. От шероховатости шлифованной поверхности зависит протекание данных технологических операций, внешний вид и качество изделий [3, 5, 8, 9]. Автоматизация производства, возросшие требования к внешнему виду обработанной поверхности требуют постоянного совершенствования дерево-режущего инструмента, условий его эксплуатации, улучшения подготовки и снижения стоимости.

В настоящее время на деревообрабатывающих предприятиях четко прослеживается курс на применение шлифования в точный размер, операции фрезерования заменяются абразивным калиброванием. Происходит переход на новые типы мебели с увеличенным количеством деталей из цельной древесины, имеющих сложную форму [1, 3, 4, 8, 9, 11, 18].

Для обеспечения потребности деревообрабатывающих предприятий в современном дерево-режущем инструменте необходимо постоянно совершенствовать жесткий и эластичный абразивный инструмент и разрабатывать новые виды такого инструмента.

В статье приводится анализ общего объема поверхностного свободного пространства для размещения продуктов обработки в абразивных кругах из сферокорунда по сравнению с абразивными кругами из сплошных абра-

живных материалов. На износостойкость и производительность абразивного инструмента достаточно большое влияние оказывает объем его межзернового пространства.

Изучением применения абразивных кругов из сферокорунда при шлифовании древесины и древесных материалов занимались многие отечественные [2, 4, 6, 7, 10, 12, 13, 17] и зарубежные [14–16, 18] ученые. Исследователи процесса шлифования древесины отмечают, что применение абразивных кругов имеет определенные преимущества перед шлифовальной шкуркой: высокая точность обработки, получение требуемого качества обработанной поверхности, высокая стойкость инструмента, его низкая стоимость [2, 4, 6, 10, 11, 15, 16].

Использование абразивных кругов из сферокорунда позволяет повысить производительность процесса шлифования древесины, а также расширить область применения жесткого абразивного инструмента за счет снижения засаливания инструмента и ликвидации прижогов обработанной поверхности [2, 3, 5, 6, 11, 16].

#### *Объекты и методы исследования*

Основными характеристиками абразивного инструмента, определяющими его рабочие свойства, являются зернистость, твердость и структура. Для получения различной твердости и структуры необходимо обеспечить определенное количественное соотношение абразивных зерен, связки и пор в единице объема инструмента. Относительное содержание зерен  $\beta_g$ , связки  $\beta_b$  и пор  $\beta_p$  в абразивном инструменте рассчитывается следующим образом:

$$\beta_g = \frac{V_g}{V_k}; \beta_b = \frac{V_c}{V_k}; \beta_p = \frac{V_p}{V_k}; \quad (1)$$

$$\beta_g + \beta_b + \beta_p = 1,$$

где  $V_g, V_k, V_c, V_p$  – объемы соответственно зерен, круга, связки, пор, м<sup>3</sup>.

Но так как абразивное зерно сферокорунда представляет собой сферу, то внутризерновое свободное пространство абразивного материала можно отнести к объему пор в круге. Тогда для абразивных кругов из сферокорунда формулы (1) примут вид

$$\beta_g = \frac{V_g - V_{is}}{V_b}; \beta_b = \frac{V_b}{V_b}; \beta_p = \frac{V_p - V_{is}}{V_b}, \quad (2)$$

где  $V_{is}$  – объем внутризернового пространства в круге, м<sup>3</sup>;  $V_b$  – плотность связки, кг/м<sup>3</sup>.

Общий объем внутризернового пространства в круге находим из объемного отношения внутризернового пространства отдельного зерна основной фракции зернистости  $V'_{is}$  к объему зерна  $V'_g$ :

$$V_{is} = \frac{V'_{is}}{V'_g} V_g. \quad (3)$$

С учетом выражения (3), формулы (2) примут окончательный вид для расчета относительного содержания абразивного материала, связки и пор в абразивном круге из сферокорунда:

$$\beta_g = \frac{V_g \left(1 - \frac{V'_{is}}{V'_p}\right)}{V_b}; \beta_b = \frac{V_b}{V_b}; \beta_p = \frac{V_p + V_g \frac{V'_{is}}{V'_g}}{V_b}. \quad (4)$$

Объем абразивного материала сферокорунда в круге зависит от процентного содержания, определяемого рецептурой изготовления, и насыпной плотности абразивного зерна  $\rho_g$ :

$$V_g = \frac{m_g}{\rho_g} \left(1 - \frac{V'_{is}}{V'_g}\right),$$

где  $m_g$  – масса зерна в круге, кг.

Объем связки в абразивном инструменте, изготовленном с применением порообразователя, как в нашем случае для кругов из сферокорунда, будет равен:

$$V_b = \frac{m_b}{\rho_b} - V_0,$$

$m_b$  – масса связки в круге, кг;  $V_0$  – объем порообразователя в круге, м<sup>3</sup>.

Объем пор в круге определяется из выражения

$$V_p = V_b - V_g - V_b.$$

Результаты расчетов по формулам (4) относительного содержания абразивного материала, связки и пор в зависимости от размеров абразивных зерен сферокорунда представлены на рис. 1. Расчеты производились по рецептуре опытных абразивных кругов.

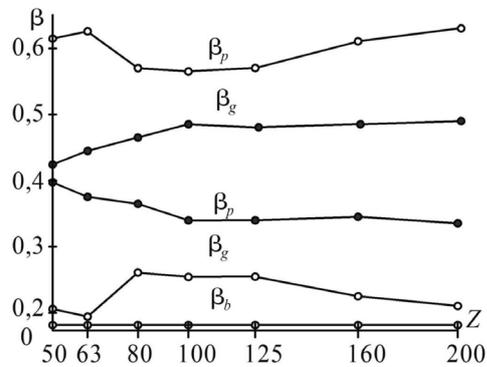


Рис.1. Зависимость относительного содержания зерен, связки и пор в абразивном инструменте от зернистости  $z$  ( $\rho_b = 700$  кг/м<sup>3</sup>): —○—○— для сферокорунда; —●—●— для сплошного абразивного материала

Fig. 1. Dependence of the relative content of grains, binder and pores in the abrasive tool on the grain size  $z$  ( $\rho_b = 700$  kg/m<sup>3</sup>): —○—○— for spherical corundum; —●—●— for solid abrasive material

Из полученных теоретических результатов видно, что абразивные круги из сферокорунда по сравнению с кругами из других абразивных материалов, изготовленных по единой технологии и рецептуре, имеют значительно больший объем пор. С увеличением номера зернистости абразивного материала и плотности абразивных кругов отношение объема пор в кругах из сферокорунда к объему пор в кругах из других абразивных материалов увеличивается. С повышением плотности кругов из сферокорунда происходит снижение относительного содержания пор в круге: при изменении плотности с 600 до 800 кг/м<sup>3</sup> относительное содержание пор снижается на 16–20 %. С ростом номера зернистости абразива относительное содержание зерен и пор в круге из сферокорунда изменяется по сложной зависимости.

При изготовлении абразивного инструмента регламентируются характеристики внутреннего объемного строения: зернистость, содержание зерна и связки. При шлифовании непосредственное участие в работе принимает периферийная поверхность круга, его рельеф. Для описания рельефа круга из сферокорунда необходимо установить связь объемных характеристик с его поверхностными геометрическими параметрами, которые необходимы для определения всех основных показателей процесса шлифования.

Исходя из того, что абразивные зерна сферокорунда имеют почти совершенно правильную геометрическую форму, внутреннее объемное и поверхностное строение круга из сферокорунда должно описываться моделью, где абразивные зерна представлены в виде сфер. Абразивные зерна обычного абразивного материала чаще всего моделируются в виде шара, реже в виде сплюсненного или вытянутого эллипсоидов вращения. В последнем случае основными параметрами, характеризующими абразивные зерна, являются объем и площадь поперечного сечения. Параметры, характеризующие абразивное зерно в форме шара, представлены в таблице.

**Параметры абразивного зерна и его вершин**  
**Parameters of abrasive grains and their tops**

Характерный размер	Коэффициент объема зерна	Площадь поперечного сечения	Объем зерна	Коэффициент формы вершины зерна	Объем вершины зерна	Коэффициент площади сечения зерна	Площадь сечения вершины	Коэффициент площади сечения вершины	Размер сечения зерна	Коэффициент размера сечения зерна
$d$	0,523	$0,785d^2$	$0,523d^3$	1,57	$1,57dy^2$	0,785	$1,33y\sqrt{dy}$	1,33	$2dy$	2

Примечание:  $d$  – диаметр;  $y$  – глубина профиля.

Для абразивного зерна в форме сферы, кроме параметров, указанных в таблице, необходимо учитывать толщину стенки сферы.

Определение поверхностных геометрических параметров абразивных кругов из сферокорунда, влияния на них объемных характеристик производим по методике, изложенной в работах [1, 5, 11]. Расстояние между зернами на поверхности круга  $\delta$  представляется как функция от диаметра, относительного

содержания зерна и связки, коэффициента формы и ориентации зерен на поверхности круга  $K_g$  и глубины профиля:

$$\delta = f(d, \beta_g, \beta_b, K_g, y).$$

Рассмотрим на поверхности круга элемент объема, образованный сечениями двух соседних зерен, разделенных расстоянием  $\delta$  и разновысотностью  $H$ . Этот объем имеет высоту  $y > H$  и ширину  $x$ , равную размеру зерна в поперечном сечении на глубине  $y$ . Начало системы координат совпадает с вершиной наиболее выступающего зерна, а ось  $OY$  направлена внутрь круга по нормали к нему. Схема для расчета поверхностных геометрических параметров представлена на рис. 2.

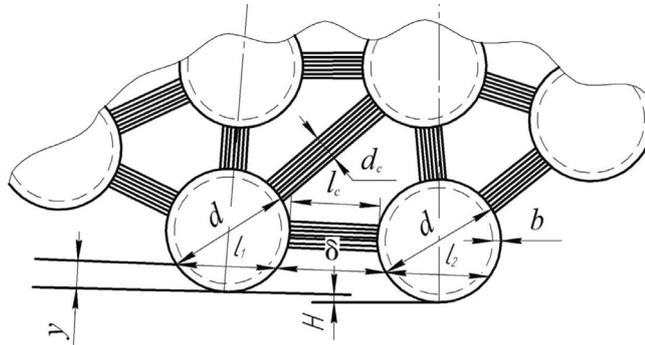


Рис. 2. Схема для определения поверхностных геометрических параметров абразивного круга из сферокорунда:  $l_1, l_2$  – длина мостиков;  $d_c$  – толщина связок;  $l_c$  – расстояние между двумя точками

Fig. 2. Scheme for determining the surface geometric parameters of an abrasive wheel made of spherical corundum:  $l_1, l_2$  – ligament length;  $d_c$  – binder thickness;  $l_c$  – distance between two points

Выделенное пространство состоит из трех объемов, два из которых составляют половины отсекаемых частей вершин зерен и определяются по формулам:

$$V_1 = \frac{1}{2} \mu_{is} d y^2;$$

$$V_2 = \frac{1}{2} \mu_{is} d (y - H)^2,$$

где  $\mu_{is}$  – коэффициент материала.

Для расчета выделенного объема, заключенного между зернами, будем считать, что поверхностные характеристики инструмента полностью определяются его объемными соотношениями, т. е.

$$V_{bs} / V_{bb} = \beta_p / \beta_b = K_p,$$

где  $V_{bs}$  – объем поверхностной межзерновой поры, м<sup>3</sup>;  $V_{bb}$  – объем мостика связки, м<sup>3</sup>;  $K_p$  – коэффициент пористости.

Откуда

$$V_{bs} = \beta_p / \beta_b \cdot V_{bb} = K_p V_{bb}. \tag{5}$$

В объемной модели абразивного инструмента связку представляют в виде небольших перемишек – мостиков связки, скрепляющих абразивные зерна. Каждый мостик характеризуется размерами и формой. Объем мостика определяется по формуле

$$V_{bb} = \mu_{bb} l_b d_b^2, \quad (6)$$

где  $\mu_{bb}$  – коэффициент формы мостика связки;  $l_b$  – длина мостика связки, м;  $d_b$  – поперечный размер мостика связки, м.

Размеры мостика связки можно найти из выражений:

$$l_b = d \left( \left( \mu_g / \mu'_g \right) (1 / \beta_g) - 1 \right); \quad (7)$$

$$d_b = d \sqrt{\frac{\beta_b \cdot \mu_g \cdot 1}{\beta_g \mu_b \cdot \mu'_g \cdot \left( \mu_g / \mu'_g \right) (1 / \beta_g) - 1}}, \quad (8)$$

где  $\mu_g, \mu'_g$  – коэффициенты материала.

Максимальное число мостиков связки на одно зерно

$$\mu_{\max\_bb} = 19,5(\beta_g + \beta_b) - 2,5.$$

Необходимо отметить, что при расчете по данным формулам относительное содержание зерен и связки принимается как для кругов из сплошного абразивного материала.

Общий объем выделенного пространства на поверхности круга

$$V_1 + V_2 + V_{bs} = \frac{1}{2} \mu_{is} d \left( y^2 + (y - H)^2 \right) + K_p d^3 \frac{\beta_b}{\beta_g (19,5(\beta_g + \beta_b) - 2,5)} \cdot \frac{\mu_g}{\mu'_g} \mu_{bb}. \quad (9)$$

Данный объем зависит от формы сечения вершины зерна:

$$V = x y \delta = \mu'_{is} \cdot y \sqrt{dy} \cdot \delta, \quad (10)$$

где  $x$  – поперечный размер сечения вершины, м;  $\mu'_{is}$  – коэффициент вершины зерна.

Приравняв различные выражения для объема (9) и (10), получим

$$\delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu_{is}}{\mu'_is} \sqrt{dy} \left( 1 + \left( 1 - \frac{H}{y} \right)^2 \right) + K_p \frac{\beta_b}{\beta_g (19,5(\beta_g + \beta_b) - 2,5)} K_g \frac{d^{2,5}}{y^{1,5}}, \quad (11)$$

где  $K_g = \frac{\mu_g}{\mu'_g} \cdot \frac{\mu_{bb}}{\mu_{is}}$ .

Абразивные зерна сфорокорунда в процессе работы и правки круга разрушаются, происходит обнажение острых режущих стенок абразивного зерна. Если рассматривать процесс шлифования в плоскости торцового сечения круга, то передняя по направлению вращения круга стенка зерна и задняя выступают как самостоятельные режущие элементы, связанные между собой определенными зависимостями. Поэтому для описания рельефа круга из сфорокорунда необходимо принимать глубину профиля, сопоставимую с диаметром абразивного зерна. В этом случае  $y$  значительно больше  $H$  и их отношение  $\frac{H}{y}$  в формуле (11) можно приравнять к нулю.

Принимаем, что мостик связки имеет форму прямоугольного параллелепипеда, для которого  $\mu_{bb} = 1$ , тогда коэффициент формы и ориентации зерен на поверхности круга  $K_g = 0,5$ . После преобразований и подстановки численных значений коэффициентов, указанных в таблице, формула (11) принимает вид

$$\delta = 1,18\sqrt{dy} + \frac{1 - \beta_b - \beta_g}{\beta_g (19,5(\beta_g + \beta_b) - 2,5)} \cdot 0,5 \frac{d^{2,5}}{y^{1,5}}.$$

Данная формула устанавливает зависимость расстояния между абразивными зёрнами на поверхности круга от всех его характеристик: зернистости, содержания зерна, связки, а также от глубины профиля, т. е. расстояния от поверхности круга, на котором рассматривается указанная зависимость.

Расстояние между стенками абразивного зерна  $l$  на определенной глубине профиля будет описываться формулой

$$l = 2\sqrt{(y-b)(d-b-y)},$$

где  $b$  – толщина стенки абразивного зерна, м.

Этой зависимостью устанавливается связь расстояния между режущими элементами отдельного зерна на поверхности круга с его размерами и координатой  $y$ . Объемные параметры  $\beta_g$  и  $\beta_b$  не оказывают влияния на расстояние между стенками зерна.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Общий объем допустимого заполнения поверхностных впадин продуктами обработки в абразивных кругах из сферокорунда будет состоять из объема свободного поверхностного межзернового пространства и пространства внутризернового. Определение объема свободного межзернового пространства между двумя зёрнами производится по формулам (5)–(8) и зависит от объемных параметров круга. Объем поверхностного внутризернового пространства одного зерна рассчитывается по формуле

$$V_{is} = \mu_g (y-b) \left( \frac{3}{4} l^2 + (y-b)^2 \right).$$

Он полностью определяется геометрическими размерами зерна и координатой глубины профиля.

Теоретические зависимости расстояний между режущими элементами абразивного круга из сферокорунда  $b$  и  $l$  от диаметра абразивного зерна, относительного содержания связки, зерна и глубины профиля представлены на рис. 3.

На рис. 4 отражена зависимость объемов поверхностного межзернового пространства и поверхностного внутризернового пространства от диаметра зерна. Влияние зернистости на объем внутризернового пространства в круге определено из предположения, что  $y = d/2$ , т. е. объем равен половине внутрисферического пространства абразивных зерен основной фракции зернистости.

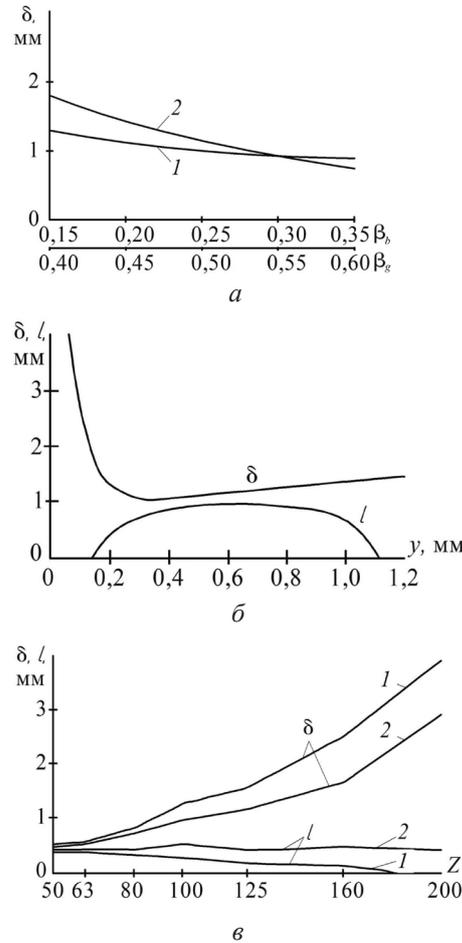


Рис. 3. Зависимость расстояния:  $a$  – между зернами  $\delta$  от относительного содержания связки в круге (1) и относительного содержания зерен в круге (2) ( $d = 1,25$  мм;  $\beta_g = 0,485$ ;  $y = 0,20$  мм);  $б$  – между зернами  $\delta$  и между стенками  $l$  от глубины профиля ( $d = 1,25$  мм;  $\beta_b = 0,171$ ;  $\beta_g = 0,485$ );  $в$  – между зернами  $\delta$  и между стенками абразивного зерна  $l$  от зернистости  $z$  ( $\rho_b = 700$  кг/м<sup>3</sup>;  $\beta_b = 0,171$ ;  $l - y = 0,15$  мм;  $2 - y = 0,20$  мм)

Fig. 3. Dependence of the distance:  $a$  – between the grains  $\delta$  on the relative content of the binder in the circle (1) and the relative content of the grains in the wheel (2) ( $d = 1.25$  mm;  $\beta_g = 0.485$ ;  $y = 0.20$  mm);  $б$  – between the grains  $\delta$  and between the walls  $l$  on the profile depth ( $d = 1.25$  mm;  $\beta_b = 0.171$ ;  $\beta_g = 0.485$ );  $в$  – between the grains  $\delta$  and between the walls of an abrasive grain  $l$  on the grain size  $z$  ( $\rho_b = 700$  kg/m<sup>3</sup>;  $\beta_b = 0.171$ ;  $l - y = 0.15$  mm;  $2 - y = 0.20$  mm)

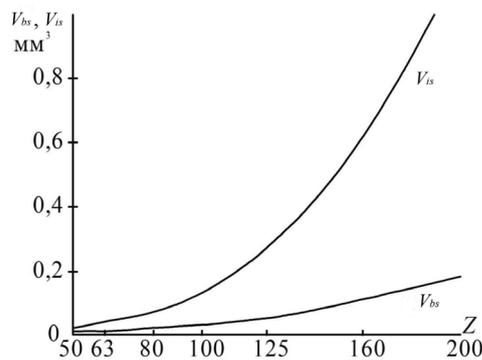


Рис. 4. Зависимость поверхностных объемов межзернового  $V_{bs}$  и внутризернового  $V_{is}$  пространства от зернистости  $z$  ( $y = d/2$ ;  $\rho_b = 700$  кг/м<sup>3</sup>)

Fig. 4. Dependence of the surface intergranular  $V_{bs}$  and intragranular  $V_{is}$  volumes on the grain size  $z$  ( $y = d/2$ ;  $\rho_b = 700$  kg/m<sup>3</sup>)

#### Заключение

Геометрические поверхностные параметры являются функцией не только объемных характеристик круга, но и координаты глубины профиля, направленной внутрь круга по нормали к нему. Расстояние между стенками абразивного зерна на поверхности круга полностью определяется его размерами и координатой глубины профиля. На расстояние между зернами воздействует, кроме размеров зерна и глубины профиля, содержание в круге зерен и связки.

Общий объем поверхностного свободного пространства для размещения продуктов обработки в абразивных кругах из сферокорунда по сравнению с абразивными кругами из сплошных абразивных материалов, изготовленных по единой технологии и рецептуре, больше на величину поверхностного внутризернового пространства. Внутризерновой объем на рабочей поверхности круга из сферокорунда значительно превышает межзерновой поверхностный объем и интенсивно увеличивается с ростом зернистости абразивного материала, что положительно влияет на износостойкость и производительность абразивного инструмента за счет уменьшения объема застревающей стружки в этих пространствах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Братан С.М. Идентификация параметров съема при комбинированном шлифовании // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: материалы междунар. сб. науч. тр. Донецк: ДонГТУ, 2000. С. 24–32.  
Bratan S.M. Identification of Removal Parameters in Combined Grinding. *Advanced Technologies and Systems of Mechanical Engineering. Proceedings of the International Collection of Academic Papers*. Donetsk, DonGTU Publ., 2000, pp. 24–32. (In Russ.).
2. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание М.: Машиностроение, 1990. 224 с.  
Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokol'nikov M.G. *Abrasive Wear*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990. 224 p. (In Russ.).
3. Гдалевич А.И. Финишная обработка лепестковыми кругами. М.: Машиностроение, 1990. 112 с.  
Gdalevich A.I. *Finishing Treatment with Flap Wheel*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990. 112 p. (In Russ.).
4. Гришкевич А.А., Костюк О.И. Увеличение периода эксплуатации шлифовального инструмента при обработке древесины // Вестн. БарГУ. Сер.: Техн. науки. 2015. Вып. 3. С. 17–21.  
Grishkevich A.A., Kostyuk O.I. Increasing the Operating Period of Grinding Tool in the Processing of Wood. *BarSU Herald. Series Engineering*, 2015, iss. 3, pp. 17–21. (In Russ.).
5. Калинин Е.П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Рыбинск, 2006. 34 с.  
Kalinin E.P. *Theory and Practice of Abrasive Processing Productivity Control with Regard to Tool Blunting*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Rybinsk, 2006. 34 p. (In Russ.).
6. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Севастополь: СевНТУ, 2012. 304 с.  
Novoselov Yu.I. *Dynamics of Surface Shaping in Abrasive Processing*. Sevastopol, SevNTU Publ., 2012. 304 p. (In Russ.).
7. Переладов А.В., Камкин И.П. Определение режима изнашивания инструмента при шлифовании // Изв. ВолгГТУ. 2015. № 11(173). С. 24–29.  
Pereladov A.V., Kamkin I.P. Determination of the Wear Mode of the Tool during Grinding. *Izvestia VSTU*, 2015, no. 11(173), pp. 24–29. (In Russ.).
8. Рыбин Б.М., Кириллов Д.В. Оценка фактического объема полостей неровностей на обработанной поверхности древесины // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2014. № 4. С. 131–137.

Rybin B.M., Kirillov D.V. Assessment of the Actual Volume of Cavities Irregularities on the Processed Surface of Wood. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2014, no. 4, pp. 131–137. (In Russ.).

9. Санев В.И., Каменев Б.Б., Сергеевичев А.В. Резание древесины и древесных материалов. СПб.: Лань, 2018. 456 с.

Sanev V.I., Kamenev B.B., Sergeevichev A.V. *Cutting Wood and Wood Materials*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2018. 456 p. (In Russ.).

10. Сергеевичев А.В. Анализ разрушения абразивных зерен при шлифовании древесины и древесных материалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 5. С. 117–125.

Sergeevichev A.V. The Analysis of Destruction of Abrasive Grains during the Grinding of Wood and Wood Materials. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2015, no. 5, pp. 117–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.5.117>

11. Силин С.С., Леонов Б.Н., Хрульков В.А., Поletaев В.А. Оптимизация технологии глубинного шлифования. М.: Машиностроение, 1989. 120 с.

Silin S.S., Leonov B.N., Khrul'kov V.A., Poletaev V.A. *Optimization of Deep Grinding Technology*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989. 120 p. (In Russ.).

12. Хватов Б.Н., Зубков Д.В., Родина А.А. Исследование производительности шлифования абразивными лентами с самозатачивающимся зерном // Вестн. ТГТУ. 2012. Т. 18, № 4. С.1031–1037.

Khvatov B.N., Zubkov D.V., Rodina A.A. Research into Grinding Rate of Abrasive Belt with Self-Sharpening Grain. *Transactions of the TSTU*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 1031–1037. (In Russ.).

13. Хромчак И.И. Абразивная обработка плитных материалов на минеральных вяжущих: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львов, 1990. 20 с.

Khromchak I.I. *Abrasive Processing of Plate Materials on Mineral Binders*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Lviv, 1990. 20 p. (In Russ.).

14. Brinksmeier E., Aurich J.C., Govekar E., Heinzl C., Hoffmeister H.-W., Klocke F., Peters J., Rentsch R., Stephenson D.J., Uhlmann E., Weinert K., Wittmann M. Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes. *CIRP Annals*, 2012, vol. 55, iss. 2, pp. 667–696. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.003>

15. Cai G.Q., Feng B.F., Jin T., Gong Y.D. Study on the Friction Coefficient in Grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 129, iss. 1-3, pp. 25–29. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00569-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00569-1)

16. Carrano A.L., Taylor J.B. Geometric Modeling of Engineered Abrasive Processes. *Journal of Manufacturing Processes*, 2005, vol. 7, iss. 1, pp. 17–27. [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(05\)70078-5](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(05)70078-5)

17. Sergeevichev A., Kushnerev V., Sergeevichev V., Sokolova V., Onegin V. Analysis of the Influence of Instrumental and Regime Factors on the Quality of Wood Grinding. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1399, iss. 4, art. 044043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044043>

18. Zhou X., Xi F. Modeling and Predicting Surface Roughness of the Grinding Process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, vol. 42, iss. 8, pp. 969–977. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00011-1)

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest

---

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article