

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

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

Научная статья

УДК 621.929

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-5-16

АНАЛИЗ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШЛИФОВАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЦЕПТУРЫ И УСЛОВИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АБРАЗИВНОЙ МАССЫ

**Романенко Андрей Михайлович, Шатько Дмитрий Борисович,
Мельник Александр Евгеньевич**

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: shdb.tm@kuzstu.ru

Аннотация.

Технология производства абразивных инструментов напрямую влияет как на их эксплуатационные характеристики, так и на параметры самого процесса абразивной обработки, включая качество обработанной поверхности. В свою очередь, процесс смешивания компонентов абразивной смеси в значительной мере определяет итоговые эксплуатационные параметры инструмента, что обуславливает актуальность проведения исследований данного процесса. В качестве составных задач исследования приняты разработка модели, достоверно описывающей процесс получения абразивной массы, и выявление влияния рецептуры и режима смешивания на ее технологические показатели.

В работе проанализировано воздействие состава шихты и метода смешивания ингредиентов на физико-механические характеристики абразивного инструмента. Описана технологическая схема производства изделий на керамической связке. Представлены обобщенные статистические модели, отражающие связь между компонентами смеси и итоговыми свойствами продукции. Разработана математическая модель, имитирующая процесс смешивания абразивных масс. По итогам исследования сформулированы практические рекомендации, направленные на повышение качества абразивных кругов за счет оптимизации их состава и режимов смешивания. Отмечено, что ключевое влияние на время смешивания компонентов оказывает коэффициент внутреннего трения массы. Исследования показали, что увеличение данного коэффициента приводит к росту временных затрат на гомогенизацию. Исходя из этого, целесообразно использовать различные подходы для снижения коэффициента внутреннего трения, например, за счет введения специальных технологических добавок в виде выгорающих либо невыгорающих наполнителей. Важным фактором процесса смешивания является равномерность распределения ингредиентов в объеме смеси, на которую влияют последовательность их загрузки и удельный вес отдельных компонентов.

**Информация о статье**

Поступила:

12 мая 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 сентября 2026 г.

Принята к публикации:

15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:

абразивный круг, связка, зернистость, твердость, технология изготовления, рецептура, математическая модель

Для цитирования: Романенко А.М., Шатько Д.Б., Мельник А.Е. Анализ физико-механических свойств шлифовального инструмента в зависимости от рецептуры и условий изготовления абразивной массы // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 4 (176). С. 5-16. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-5-16, EDN: NFLEZX

Введение

Ключевыми требованиями к процессу шлифования являются обеспечение заданной скорости обработки, необходимого класса шероховатости, точности геометрических параметров детали в пределах допуска, а также исключение дефектов в виде прижогов на обрабатываемой поверхности. Совокупность этих требований формирует критерии качества абразивного инструмента [1–3] и определяет особенности технологии его производства [4]. Наиболее востребованными при финишных операциях и доводке являются инструменты на керамической связке [5–7]. Технологический цикл их изготовления включает ряд последовательных стадий:

1. Подготовка формовочной композиции, которая реализуется поэтапно:

- гомогенизация абразивных зерен;
- добавление керамической связки;
- введение модифицирующих добавок (при необходимости).

2. Формообразование заготовок методом прессования.

3. Термическая обработка, включающая сушку и последующий обжиг сформованных изделий. Особое значение в технологической цепочке придается стадии смешивания компонентов, так как именно этот этап в наибольшей степени определяет итоговые эксплуатационные характеристики инструмента [8–10].

Выбор состава и свойств абразивного инструмента детерминируется тремя основными факторами: условиями обработки (характером операции), физико-механическими характеристиками обрабатываемого материала и экономической эффективностью процесса шлифования [11, 12]. Рецептура инструмента разрабатывается с учетом режимов эксплуатации, типа обрабатываемой поверхности, требуемой производительности и себестоимости производства.

При проектировании состава абразивной массы необходимо определить следующие параметры:

1. Тип абразива и его плотность. Приоритетом при выборе является обеспечение высокой прочности зерен (в том числе усталостной) и их устойчивости к износу.

2. Зернистость. Данная характеристика напрямую коррелирует с требуемым классом шероховатости обрабатываемой поверхности.

3. Степень твердости. Выбор твердости круга зависит от уровня нагрузок на единичное зерно:

повышение сил резания требует применения более твердых кругов, тогда как снижение нагрузки диктует необходимость использования мягких композиций.

4. Модификация связующего. Тип керамической связки подбирается исходя из показателей ее прочности при растяжении.

5. Структура инструмента. Интенсификация скоростных режимов резания, особенно при снятии стружек большого сечения, предполагает использование более открытых (пористых) структур [13].

6. Природа наполнителя. Используются две категории порообразующих компонентов:

- выгорающие добавки (например, измельченные фруктовые косточки фракцией до 1,2 мм), которые в процессе термической обработки создают в теле круга поры [14].

- невыгорающие микросферы (полые частицы из электрокорунда или стекла размером до 120 мкм), разрушающиеся в процессе резания и формирующие дополнительные режущие элементы [15].

Выбор типа наполнителя и его концентрации обусловлен требованиями к структуре и физико-механическим характеристикам готового инструмента.

Качество обработки и эксплуатационная надежность детали в значительной степени определяются режимами шлифования, при этом важнейшую роль играет внутреннее строение (структура) используемого абразивного круга. Тип наполнителя и его концентрация непосредственно влияют на итоговые физико-механические характеристики инструмента. В свою очередь, качество обработки и эксплуатационная надежность готовой детали определяются не только режимами шлифования, но и структурными особенностями абразивного круга.

Шлифовальный круг является многокомпонентным композитом, включающим абразивные зерна, связующее вещество и функциональные наполнители [16]. Каждый из перечисленных компонентов характеризуется индивидуальными физико-механическими параметрами: плотностью, гранулометрическим составом, твердостью исходных частиц и коэффициентом внутреннего трения. Различие этих свойств обуславливает неравномерность пространственного распределения ингредиентов в объеме абразивной массы при смешивании и способствует образованию конгломератов (агломератов) частиц. Подобная неоднородность может стать причиной возникновения

дисбаланса готового изделия и, как следствие, существенного снижения качества обработанной поверхности. Таким образом, данный фактор необходимо учитывать как при проектировании рецептуры круга, так и при выборе технологии смешивания компонентов [17].

представляют собой сыпучие смеси с сильно отличающимися характеристиками (плотность, твердость, внутреннее трение). При смешивании они распределяются неравномерно, что ведет к нежелательному эффекту – образованию сгустков из одинаковых частиц [19].



а) б)
Рис. 1. Барабанный смеситель для абразивных масс
а) общий вид

б) рабочие органы смесителя
Fig. 1. Drum mixer for abrasive mixtures

а) general view
б) mixing elements

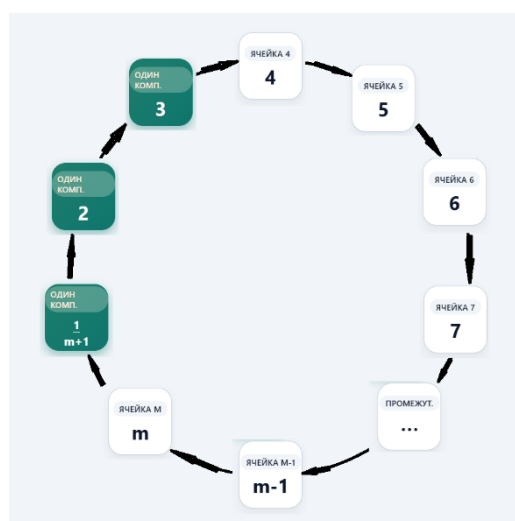


Рис. 2. Схема смесителя

Fig. 2. Mixer diagram

Хотя требуемые рабочие характеристики инструмента задают выбор ингредиентов и их дозировку, именно процесс смешивания формирует его внутреннее строение и распределение компонентов. Также на свойства круга воздействует форма абразивных частиц [18].

Методы

Свойства круга, его прочность и технологические параметры напрямую диктуют и состав абразивной массы, и способ ее приготовления. Исходные компоненты круга

В связи с этим была сформулирована задача: разработать модель, которая достоверно описывает процесс получения абразивной массы, и выявить, как рецептура и режим смешивания влияют на ее технологические показатели. Оптимальный инструмент для этого – методы математического моделирования физических процессов. Несмотря на определенную долю приближенности, они позволяют всесторонне оценить процесс при разных параметрах, меняя не саму модель, а ее настройки. Наиболее удобны с точки зрения составления балансовых

уравнений ячеечные модели и модели на основе цепей Маркова (первые – для потоков массы, вторые – для вероятностей). Их главное преимущество – учет случайного, вероятностного характера смешивания, что свойственно марковским процессам.

распределения) от разности между плотностью абразива и средней плотностью смеси.

Рис. 3, б иллюстрирует, каким образом коэффициент внутреннего трения сказывается на количестве циклов (переходов), требуемых для гомогенизации абразивных зерен по объему.

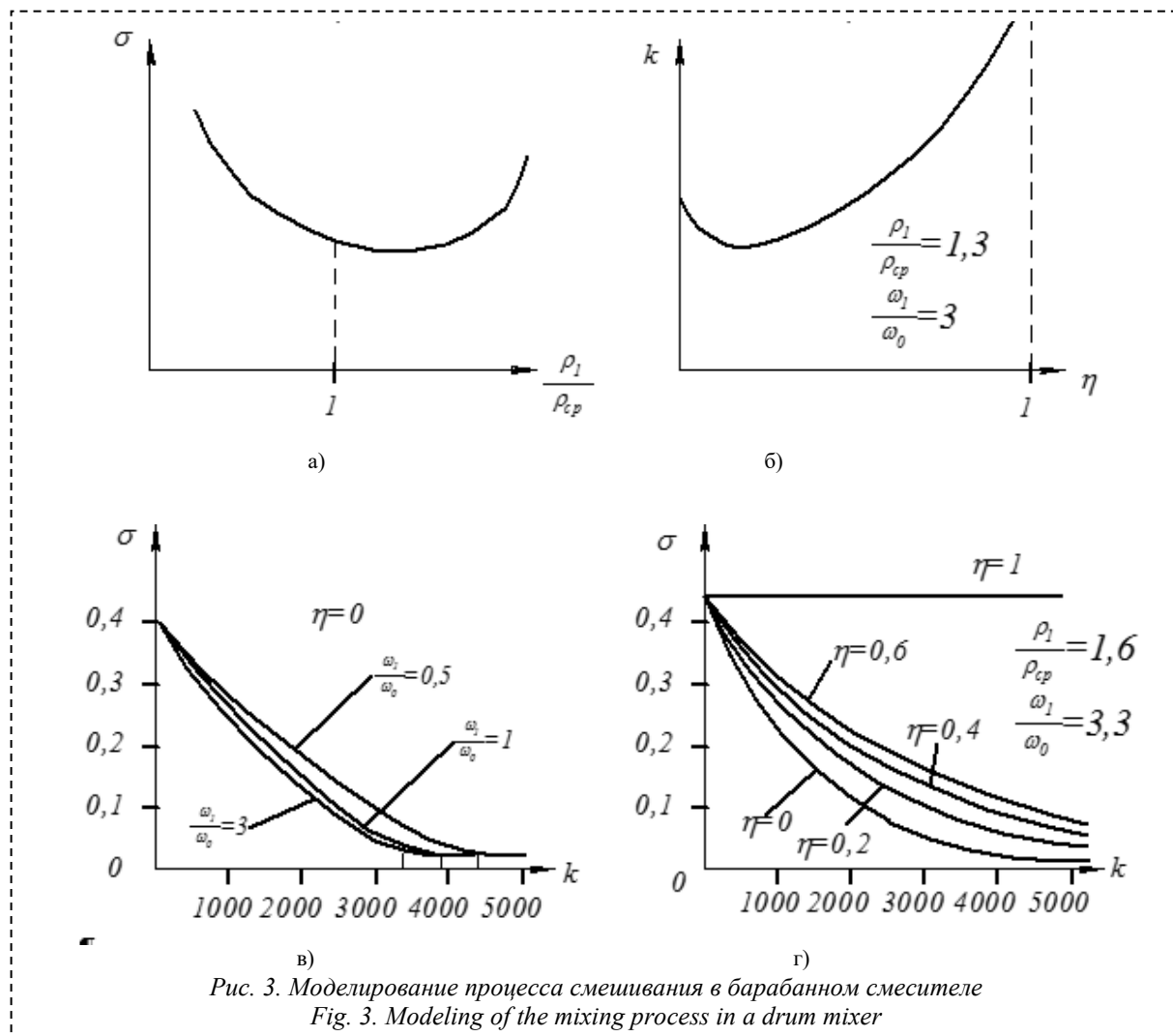


Рис. 3. Моделирование процесса смешивания в барабанном смесителе
Fig. 3. Modeling of the mixing process in a drum mixer

Универсальный принцип построения таких моделей для любых смесителей заключается в составлении матрицы начальных состояний (вероятность нахождения компонента в заданной ячейке цепи) и матрицы переходов (вероятность перехода из одной ячейки в другую).

На абразивных предприятиях для приготовления абразивных масс наибольшее распространение получили барабанные смесители с мешалкой, расположенной эксцентрично вращающемуся корпусу (Рис. 1, а и б).

На Рис. 2 представлена схема смесителя. Ячейки с закрасненными прямоугольниками содержат только один компонент смеси.

На Рис. 3, а представлена зависимость среднеквадратического отклонения доли абразивных частиц (после стабилизации

Графики на Рис. 3, в и 3, г отражают динамику среднеквадратического отклонения концентрации абразива в контрольных ячейках в ходе смешивания. Данные кривые наглядно демонстрируют, как реологические свойства смеси и скоростные режимы смесителя влияют на кинетику процесса.

На основе анализа представленных графических зависимостей можно сформулировать следующие выводы:

- доминирующим фактором, определяющим продолжительность смешивания до момента достижения заданной степени гомогенности, выступает коэффициент внутреннего трения абразивной массы;

- решающее влияние на равномерность распределения ингредиентов по объему смеси оказывает разность удельных плотностей компонентов.

Согласно полученным выводам, повышение качества приготовляемой абразивной массы достигается за счет трех факторов: минимизации коэффициента внутреннего трения, выравнивания плотностей используемых материалов и выбора рациональной очередности подачи компонентов в смеситель.

Поскольку твердость и прочность являются ключевыми параметрами, определяющими физико-механические свойства готового изделия, для оценки рецептурных факторов были выбраны следующие критерии: прочность на растяжение, сжатие и изгиб, а также ударная вязкость. Форма и размеры образцов, условия испытаний соответствуют требованиям ГОСТ 473.7–81 и ГОСТ 4647–80.

Для испытаний на одноосные растяжения, сжатие и изгиб использовалась разрывная машина типа «ZD 10/90» с максимальным усилием 10 тонн. Испытания по определению ударной вязкости проводились на машине типа КМ-0,5Т. Твердость определялась на пескоструйном твердомере типа ТП-400.

При определении предела прочности на разрыв, сжатие, изгиб определен следующий порядок проведения испытаний:

1. Устанавливается (либо зажимается) образец, предварительно он визуально проверяется на наличие трещин, вмятин, сколов.

2. Испытание проводится при непрерывно возрастающей нагрузке со скоростью 5 мм/мин при определении предела прочности на растяжение и сжатие, 50 мм/мин на изгиб, до момента разрушения образца. Фиксируется усилие разрушения P .

3. У образца после разрушения замеряется площадь поперечного сечения при помощи штангенциркуля с погрешностью не более 0,1 мм.

При испытании образцов на ударную вязкость разрушение образца осуществлялось посредством удара молота посередине образца с энергией в 1 Дж, с последующей фиксацией по шкале прибора, затраченной на разрушение работы ΔA .

Предел прочности материала при растяжении вычисляется по формуле:

$$\sigma_{\text{раст}} = \frac{P}{F},$$

где F – площадь поперечного сечения, мм².

Предел прочности при изгибе:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{3Pl}{2bh^2},$$

где l – расстояние между опорами, мм;

b – ширина образца, мм;

h – толщина образца, мм.

Предел прочности при сжатии ($\sigma_{\text{сж}}$):

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{2P}{\pi dh},$$

где d и h – диаметр и высота образца, мм.

Ударная вязкость:

$$a_n = \frac{\Delta A}{bh},$$

где b и h – ширина и толщина образца, мм.

Оценка выделяющихся опытных данных осуществлялась с помощью критерия Груббса следующим образом.

1. Рассчитывается среднее арифметическое значение:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i,$$

где n – общее число наблюдений.

2. Определяется среднеквадратичное отклонение (СКО):

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

3. По справочной таблице в зависимости от числа испытаний и доверительной вероятности $P = 1 - \alpha$ находим значение θ .

Если $\theta > \theta_{\text{кр}}$, то X_{max} следует отбросить как опыт, совершающий грубую ошибку.

Аналогично для оценки наименьшего значения опыта подсчитываем:

$$\theta = \frac{\bar{x} - x_{\min}}{S}$$

Если $\theta > \theta_{\text{кр}}$, то $x_{\min}$ следует отбросить.

На основании полученных результатов для каждого вида испытания рассчитывается среднее арифметическое испытаний $\bar{x}$:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Среднеквадратичное отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Анализ полученных данных проводился с помощью специальной программы многофакторного регрессионного анализа.

Исследовалась форма связи между поверхностью отклика и компонентами рецептуры круга в виде:

$$\ln Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \ln x_i$$

Коэффициенты регрессии, согласно данной программе, рассчитывались по методу наименьших квадратов. Проверка коэффициентов регрессии на значимость осуществлялась с помощью t -критерия Стьюдента, представляющего собой отношение абсолютной величины оцениваемого коэффициента к его дисперсии. Дисперсия, характеризующая ошибку в определении коэффициентов регрессии, определялась по формуле:

$$S_{a_i}^2 = \frac{S_y^2}{N},$$

где S_y^2 – дисперсия воспроизводимости параметра оптимизации;

Доверительный интервал для коэффициентов регрессии определялся по формуле:

Таблица 1. Параметры статических моделей прочности на растяжение и ее СКО

Table 1. Parameters of static models for tensile strength and its standard deviation

Члены модели	Коэффициенты парной корреляции		Коэффициенты статистической модели	
a_0	-	-	821,629	-34,282
V_z	0,171	0,217	-0,285	-1,255
$V_{сф}$	0,250	-0,360	9,091	-0,947
$V_{ст}$	0,579	-0,213	37,392	-2,595
$V_{кф}$	-0,469	0,675	-40,882	7,944
$V_{св}$	0,402	0,475	4,361	4,773

Таблица 2. Параметры статических моделей прочности на сжатие и ее СКО

Table 2. Parameters of static models for compressive strength and its standard deviation

Члены модели	Коэффициенты парной корреляции		Коэффициенты статистической модели	
a_0	-	-	46,888	0,98653
V_z	-0,292	0,332	-0,1628	-0,094
$V_{сф}$	0,589	-0,448	0,104	-0,095
$V_{ст}$	0,519	-0,468	0,11489	-0,198
$V_{кф}$	-0,621	0,434	-0,032	0,195
$V_{св}$	0,604	-0,412	0,281	0,330

Таблица 3. Параметры статических моделей прочности на изгиб

Table 3. Parameters of static flexural strength models

Члены модели	Коэффициенты парной корреляции		Коэффициенты статистической модели	
a_0	-	-	1400,4874	
V_z	-0,081		-0,05925	
$V_{сф}$	0,431		0,03478	
$V_{ст}$	0,590		0,07275	
$V_{кф}$	-0,645		-0,04354	
$V_{св}$	0,215		0,32104	

Таблица 4. Параметры статических моделей ударной вязкости

Table 4. Parameters of static impact toughness models

Члены модели	Коэффициенты парной корреляции		Коэффициенты статистической модели	
a_0	-	-	30,076	
V_z	-0,474		-0,3275	
$V_{сф}$	0,591		0,04576	
$V_{ст}$	0,542		0,05070	
$V_{кф}$	-0,631		-0,01425	
$V_{св}$	0,357		0,33642	

Таблица 5. Результаты статического анализа регрессионной модели ударной вязкости

Table 5. Results of the statistical analysis of the impact toughness regression model

Коэффициент множественной корреляции	0,05356
F – критерий адекватности моделей	0,011
F – критерий для коэффициента корреляции	30,076

N – количество опытов.

$$\Delta b = \pm S b_i t,$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента.

Гипотеза об адекватности полученных математических моделей проверялась по F-критерию Фишера и принималась на уровне значимости $\alpha = 0,05$, а наличие связи между исследуемыми факторами оценивалось по коэффициенту множественной корреляции.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены обобщенные регрессионные модели, позволяющие количественно оценить степень влияния отдельных компонентов рецептуры на перечисленные прочностные характеристики инструмента.

Помимо анализа влияния компонентов на абсолютные значения свойств была проведена оценка стабильности этих показателей. В качестве критерия вариабельности использовано среднеквадратичное отклонение (СКО) результатов испытаний, на основе которого построены соответствующие модели, отражающие зависимость однородности свойств от состава рецептуры.

Результаты исследования и обсуждение

Полученные зависимости имеют вид полиномов первого порядка. Параметры статистических моделей представлены в Таблицах 1 – 5.

Прочность абразивного круга складывается из прочности зерен, связующего материала, надежности их сцепления, особенностей структуры, а также наличия внутренних дефектов и остаточных напряжений, которые возникают при формовании и термической обработке изделия [20, 21].

В отличие от пластичных материалов абразивная композиция характеризуется прочностью на растяжение, которая в 6–8 раз ниже, чем прочность на изгиб. Поскольку согласно данным разрушение круга в эксплуатации обусловлено действием центробежных сил, а именно тангенциальных растягивающих напряжений, наибольший практический интерес представляет предел прочности при растяжении.

Однако результаты определения механических свойств при растяжении характеризуются наибольшим разбросом результатов. Поэтому довольно часто испытания на прочность при растяжении заменяются определением прочности на изгиб, при котором разброс значений результатов значительно меньше. Метод трехточечного изгиба имеет максимальную воспроизводимость результатов [22]. Более высокие значения предела прочности при изгибе по сравнению с пределом прочности на растяжение можно объяснить тем, что в первом случае область действия максимальных растягивающих напряжений распространяется лишь на небольшой приповерхностный слой

материала, а прочность хрупких тел, как известно, имеет статическую природу. Наряду с определением предела прочности путем растяжения образца, что требует изготовления образцов сложной формы, использования специальных захватов, предел прочности возможно определить, используя метод диаметрального сжатия. Сущность данного метода заключается в том, что под действием сжимающей нагрузки в образце возникают растягивающие напряжения в плоскостях, перпендикулярных к направлению действия нагрузки. Этот метод характеризуется более высокой воспроизводимостью результатов, чем метод осевого растяжения. Экспериментально было установлено соотношение между значениями прочности при осевом растяжении σ_p и диаметрального сжатия $\sigma_r \approx 1,2\sigma_p$.

Метод определения ударной вязкости отличается высокой чувствительностью. Для доказательства этого достаточно отметить, что величина ударной вязкости изменяется даже при незначительном (десятые доли процента) отклонении в составе композиционного материала. На основе экспериментальных данных построены обобщенные статистические модели, устанавливающие связь между составом шихты и пределами прочности (при растяжении, сжатии, изгибе) и ударной вязкостью. С целью количественной оценки стабильности физико-механических характеристик круга дополнительно разработаны модели зависимости среднеквадратичных отклонений результатов от рецептурных компонентов. По этим моделям затем рассчитан коэффициент вариации:

$$V = \frac{s}{\bar{x}}.$$

Данные, представленные в таблицах выше, подтверждают адекватность разработанных моделей и наличие связи между учтенными факторами и физико-механическими свойствами абразивного черепка. На основе этих моделей получены зависимости свойств, их СКО и коэффициента вариации от рецептуры круга.

Анализ парных корреляций показывает: наименее значимое влияние на прочность оказывает содержание зерна (особенно слабо – на изгиб, что связано с характером разрушения при изгибе – растяжением наружных слоев при сжатых внутренних). Влияние зерна на прочность при растяжении и сжатии примерно одинаково. Степень влияния различных наполнителей также близка между собой. Максимальные коэффициенты корреляции – у объемного содержания стеклянных микросфер и фруктовых косточек; влияние электрокорундовых микросфер несколько ниже, но также заметно. Связка сильнее всего влияет на прочность при сжатии (где ее роль в передаче нагрузки максимальна) и слабее всего – на прочность при изгибе.

Разупрочнение абразивного черепка при увеличении доли зерна объясняется снижением структурной однородности, ослаблением связующих мостиков, ростом общей пористости и, как следствие, увеличением числа концентраторов напряжений. Электрокорундовые микросферы, напротив, повышают прочность: они увеличивают количество перемычек, удерживающих зерна, уменьшают открытую пористость и снижают локальную концентрацию напряжений в структуре. Стекланные микросферы дают двойной положительный эффект – во-первых, они улучшают смешивание массы (обеспечивая более равномерное распределение компонентов на этапе приготовления), а во-вторых, при обжиге, расплавляясь, служат дополнительным связующим, упрочняя контакты между зернами. Фруктовые косточки, напротив, увеличивают размер и объем пор, что закономерно снижает прочность круга. Повышение доли связки до 14% объема увеличивает прочность за счет уменьшения пористости и укрупнения связующих мостиков, однако при превышении этого порога прочность падает из-за роста дефектности (трещин, раковин, внутренних напряжений) самих мостиков связки.

Влияние состава смеси на ударную вязкость в целом аналогично его влиянию на статические прочностные характеристики круга: факторы, повышающие или понижающие прочность при растяжении, сжатии и изгибе, качественно так же действуют на сопротивление ударным нагрузкам, хотя количественные соотношения могут несколько отличаться.

Анализ коэффициентов парной корреляции показывает, что характер и степень влияния компонентов на среднеквадратичное отклонение (СКО) прочности при растяжении и сжатии одинаковы. Наименьший вклад в СКО вносит содержание зерна, поскольку его собственная прочность заведомо превышает прочность связки, и даже при заметном разбросе свойств зерен это слабо сказывается на общем разбросе прочности изделия. Наиболее сильно на СКО влияют связка (из-за присущей ей нестабильности собственных физико-механических свойств, зависящей от режимов приготовления) и фруктовые косточки, которые формируют крупные нерегулярные поры, ослабляющие структуру, создающие дополнительные концентраторы напряжений и вызывающие значительную неравномерность распределения компонентов по объему инструмента.

Введение электрокорундовых и стекланных микросфер повышает однородность строения черепка и увеличивает количество связующих перемычек между зернами, что снижает СКО прочности и, как результат, повышает

стабильность физико-механических свойств круга, делая их более предсказуемыми и воспроизводимыми в серийном производстве.

Выводы

По итогам проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Определяющим фактором, влияющим на продолжительность смешивания компонентов, является коэффициент внутреннего трения массы: его увеличение ведет к росту временных затрат на гомогенизацию. В связи с этим рекомендуется снижать коэффициент внутреннего трения за счет введения специальных технологических добавок.

2. Равномерность распределения ингредиентов в объеме смеси определяется двумя основными параметрами: разностью удельных весов компонентов и последовательностью их загрузки. Для повышения гомогенности смеси компонент с большей плотностью целесообразно вводить на завершающем этапе смешивания.

3. Введение наполнителей в виде стекланных и микрокорундовых сфер оказывает упрочняющее действие на структуру инструмента, причем влияние стекланных сфер выражено в большей степени.

4. Использование в качестве наполнителя измельченных фруктовых косточек приводит к снижению прочности абразивного круга (разупрочнению его тела).

5. Анализ степени влияния компонентов рецептуры на прочностные характеристики и ударную вязкость показывает их примерную равнозначность. Наименьшее влияние на указанные свойства оказывает содержание абразивного зерна (коэффициент парной корреляции составляет 0,293, тогда как для остальных компонентов этот показатель находится в диапазоне 0,5–0,6).

6. Введение в состав абразивной массы стекланных и электрокорундовых микросфер способствует повышению стабильности прочностных характеристик готового инструмента.

7. Увеличение доли абразивного зерна, связующего и наполнителя в виде фруктовых косточек приводит к росту неоднородности свойств, что выражается в снижении стабильности физико-механических показателей круга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мироседи А. И., Шумяч В. М. Повышение эффективности процесса абразивной обработки путем управления структурными параметрами абразивного инструмента // Технология машиностроения. 2007. № 1. С. 28–29.

2. Непогожев А. А. Повышение эффективности шлифования путем рационального подбора характеристики абразивного инструмента по температурному критерию. АО «Московский машиностроительный завод «АВАНГАРД»». 2023. С. 208–219.
3. Григорьев С. Н., Гречишников В. А., Схиртладзе А. Г. [и др.]. Резание материалов. Режущий инструмент. Москва : Юрайт, 2025. 582 с.
4. Романенко А. М., Шатко Д. Б., Непогожев А. А., Караваев Я. С. Обработка шлифованием высоколегированных коррозионно-стойких сталей на примере 12X18H10T // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2021. № 3(38). С. 98–106. DOI: 10.38013/2542-0542-2021-3-98-106.
5. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами. М. : Машиностроение, 2007. 688 с.
6. Смагина А. Р., Колесова А. С., Дудина Е. И. Современные тенденции в технологии производства абразивных инструментов на керамической связке. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. 2025. С. 675–679.
7. Смагина А. Р., Трепалина Ю. Н., Трепалин Д. В. [и др.] Разработка и исследование керамической связки для производства абразивного инструмента. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. 2025. С. 96–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-96-106.
8. Баранцева Е. А., Мизонов В. Е., Хохлова Ю. В. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет. Иваново : ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина», 2008. 116 с.
9. Макаров Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. Москва : Машиностроение, 1973. 216 с.
10. Баранцева Е. А. Моделирование и оптимизация процессов смешивания сыпучих материалов. Иваново : Ивановский государственный химико-технологический университет, 2010. 34 с.
11. Хохлова Ю. В. Исследование процессов смешивания сыпучих материалов в лопастных смесителях непрерывного действия. Иваново : Ивановский государственный химико-технологический университет, 2009. 18 с.
12. Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы : сборник статей Международной научно-технической конференции «Шлифабразив-2014». Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет. 2014. 200 с.
13. Старков В. К., Вараткова Ж. В. Композиционные шлифовальные круги с предельно высокими номерами структуры и условия их изготовления. Рыбинск : ООО «Водгашид Плюс», 2025. С. 866–872. DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-10-866-872.
14. Крюков С. А., Байдакова Н. В., Мироседи А. И., Ревзина Е. М. Шлифовальные инструменты с наполнителями и из смесей абразивов разных по форме и зернистостям. 2018. 155 с.
15. Мигранов М. Ш., Максимов И. С., Репин Д. С. Износостойкость композиционных шлифовальных кругов. Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». 2023. С. 217–222. DOI: 10.36652/0202-3350-2023-24-5-217-222
16. Romanenko A., Shatko D., Strelnikov P., Nepogozhev A. Study of the Influence of the Grinding Wheel Composition Components on Its Performance During ID Grinding // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 247. Pp. 213–222. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_23.
17. Мизонов В. Е., Berthiaux Н. Смешивание сыпучих материалов: от математического моделирования к новым конструкциям смесителей. Иваново : Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, 2019. С. 49–52.
18. Баранцева Е. А. Роль лопастного перемешивания в формировании качества смесей сыпучих материалов с малым содержанием ключевого компонента // Известия высших учебных заведений. 2009. С. 108–110.
19. Коцур Ю. М., Терентьева О. А., Флисюк Е. В. Моделирование процесса перемешивания сыпучих материалов. ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургская государственная химико-фармацевтическая академия» Министерства здравоохранения Российской Федерации. Санкт-Петербург, 2017. С. 208–212.
20. Купреев М. П., Леонович Е. Н. Разработка и исследование технологических режимов изготовления шлифовальных кругов из кубического нитрида бора на керамической связке. Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины». 2009. С. 35–40.
21. Житников Ю. З., Житников Б. Ю., Матросов А. Е. Современные технологии изготовления деталей в машиностроении: технологии XXI века. Тонкие наукоемкие технологии, 2024. 228 с.
22. Осинцев А. А., Самодурова М. Н. Об укладке абразивной массы на керамической связке. ЮУрГУ. 2024. С. 110–117.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Романенко Андрей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: ram.msi@kuzstu.ru

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

Мельник Александр Евгеньевич, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: alexnevsii979@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Романенко Андрей Михайлович – постановка цели и задач исследования, разработка теоретических основ интерпретации полученных экспериментальных данных, написание текста, анализ полученных результатов, формулировка выводов.

Шатько Дмитрий Борисович – написание текста, анализ и обобщение полученных результатов, формулировка выводов, общее редактирование материала.

Мельник Александр Евгеньевич – теоретический анализ состояния исследуемой проблемы, анализ источников литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

ANALYSIS OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE GRINDING TOOL, DEPENDING ON THE FORMULATION AND MANUFACTURING CONDITIONS OF THE ABRASIVE MASS

Andrey M. Romanenko, Dmitrii B. Shatko, Alexander A. Melnik

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: shdb.tm@kuzstu.ru



Article info

Received:

15 May 2026

Accepted for publication:

01 September 2026

Accepted:

15 September 2026

Keywords: abrasive wheel, bond, grain, hardness, manufacturing technology, formulation, mathematical model

Abstract.

The technology of production of abrasive tools directly affects both their performance characteristics and the parameters of the abrasive processing process itself, including the quality of the processed surface. In turn, the process of mixing the components of the abrasive mixture largely determines the final performance parameters of the tool, which determines the relevance of conducting research on this process. As part of the research, the following tasks were set: to develop a model that accurately describes the process of obtaining the abrasive mass and to identify the influence of the formulation and mixing mode on its technological parameters. The paper analyzes the effect of the mixture composition and the method of mixing ingredients on the physical and mechanical characteristics of the abrasive tool. It describes the technological scheme for producing ceramic-bonded products. The paper presents generalized statistical models that reflect the relationship between the mixture components and the final properties of the products. A mathematical model has been developed that simulates the mixing process of abrasive masses. Based on the results of the study, practical recommendations have been formulated to improve the quality of abrasive wheels by optimizing their composition and mixing modes. It has been noted that the coefficient of internal friction of the mass has a significant impact on the mixing time. The research has shown that an increase in this coefficient leads to a longer homogenization time. Therefore, it is advisable to use

*various approaches to reduce the coefficient of internal friction, such as introducing special technological additives in the form of *выгорающие* or non-burning fillers. An important factor in the mixing process is the uniform distribution of ingredients in the mixture volume, which is influenced by the sequence of loading and the specific weight of individual components.*

For citation: Romanenko A.M., Shatko D.B., Melnik A.E. Analysis of the physical and mechanical properties of the grinding tool depending on the formulation and manufacturing conditions of the abrasive mass. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 4(176):5-16. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-5-16, EDN: NFLEZX

REFERENCES

1. Miroseidi A.I., Shumyacher V.M. Increasing the efficiency of the abrasive machining process by controlling the structural parameters of the abrasive tool. *Mechanical Engineering Technology*. 2007; 1:28-29.
2. Nepogozhev A.A. Increasing the efficiency of grinding by selecting the characteristics of the abrasive tool according to the temperature criterion. JSC Moscow Machine-Building Plant "AVANGARD". 2023. Pp. 208-219.
3. Grigoriev S.N., Grechishnikov V.A., Skhirtladze A.G. [et al.]. Cutting of materials. *Cutting Tools*. Moscow: Yurayt; 2025. 582 p.
4. Romanenko A.M., Shatko D.B., Nepogozhev A.A., Karavaev Ya.S. Grinding of High-Alloy Corrosion-Resistant Steels: The Case of 12Kh18N10T. *Bulletin of the Almaz-Antey Aerospace Defense Concern*. 2021; 3(38):98-106.
5. Starkov V.K. Grinding with high-porosity wheels. Moscow : Mashinostroenie; 2007. 688 p.
6. Smagina A.R., Kolesova A.S., Dudina E.I. Modern Trends in the Technology of Production of Abrasive Tools with Ceramic Bond. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. 2025. Pp. 675-679.
7. Smagina A.R., Trepalina Yu.N., Trepalin D.V. [et al.]. Development and Research of a Ceramic Bond for the Production of Abrasive Tools. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. 2025. Pp. 96-106. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-96-106
8. Barantseva E.A., Mizonov V.E., Khokhlova Yu.V. Mixing Processes of Bulk Materials: Modeling, Optimization, Calculation. Ivanovo : V.I. Lenin Ivanovo State Power Engineering University; 2008. 116 p.
9. Makarov Yu.I. Mixing Devices for Bulk Materials. Moscow : Mashinostroenie; 1973. 216 p.
10. Barantseva E.A. Modeling and Optimization of Bulk Material Mixing Processes. Ivanovo: Ivanovo State University of Chemical Technology; 2010. 34 p.
11. Khokhlova Yu.V. Research of Bulk Material Mixing Processes in Continuous Blade Mixers. Ivanovo: Ivanovo State University of Chemical Technology; 2009. 18 p.
12. Abrasive processing processes, abrasive tools and materials: collection of articles from the International Scientific and Technical Conference Shlifabraziv-2014. Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. 2014. 200 p.
13. Starkov V.K., Varatkova Zh.V. Composite grinding wheels with extremely high structure numbers and their manufacturing conditions. Rybinsk: Vodgashdif Plus LLC; 2025. Pp. 866-872. DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-10-866-872.
14. Kryukov S.A., Baidakova N.V., Miroseidi A.I., Revzina E.M. Grinding tools with fillers and mixtures of abrasives of different shapes and grits. 2018. 155 p.
15. Migranov M.S., Maksimov I.S., Repin D.S. Wear resistance of composite grinding wheels. Moscow State Technological University "STANKIN". 2023. Pp. 217-222. DOI: 10.36652/0202-3350-2023-24-5-217-222.
16. Romanenko A. Shatko D., Strelnikov P., Nepogozhev A. Study of the Influence of the Grinding Wheel Composition Components on Its Performance During ID Grinding. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022; 247:213-222. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_23.
17. Mizonov V.E., Berthiaux H. Mixing of bulk materials: from mathematical modeling to new mixer designs. V.I. Lenin Ivanovo State Power Engineering University. 2019. Pp. 49-52.
18. Barantseva E.A. The role of blade mixing in the formation of the quality of mixtures of bulk materials with a low content of the key component. News of higher educational institutions. 2009. Pp. 108-110.
19. Kotsur Yu.M., Terentyeva O.A., Flisyuk E.V. Modeling of the process of mixing bulk materials. «Saint Petersburg State University» St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical Academy of the Ministry of Health of the Russian Federation. 2017. Pp. 208-212.
20. Kupreev M.P., Leonovich E.N. Development and research of technological modes of manufacturing grinding wheels from cubic boron nitride on a ceramic bundle. Francis Skorina Educational institution "Gomel State University". 2009. Pp. 35-40.
21. Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Matrosov A.E. Modern Technologies of Manufacturing Parts in Mechanical Engineering: Technologies of the 21st Century. Thin Science-Intensive Technologies. 2024. 228 p.
22. Osintsev A.A., Samodurova M.N. On the Application of Abrasive Mass on a Ceramic Bond. South Ural State University. 2024. Pp. 110-117.

© 2026 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:

Andrey M. Romanenko, assistant professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: ram.msi@kuzstu.ru

Dmitrii B. Shatko, assistant professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: shdb.tm@kuzstu.ru

Alexander A. Melnik, graduate student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: alexnevsii979@mail.ru

Contribution of the authors:

Andrey M. Romanenko – setting the goal and objectives of the study, developing the theoretical foundations for interpreting the obtained experimental data, writing the text, analyzing the results, and formulating the conclusions.

Dmitrii B. Shatko – writing the text, analyzing and summarizing the results, formulating the conclusions, and general editing of the material.

Alexander A. Melnik – theoretical analysis of the state of the problem under study, and analysis of literature sources.

All authors have read and approved the final manuscript.

