

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-96-106

**Смагина А.Р., Трепалина Ю.Н., Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Сыса О.К.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
E-mail: smaginaa9@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Аннотация. В работе представлены результаты разработки и исследования керамических связок на основе легкоплавких соединений, таких как Na_2CO_3 , K_2CO_3 , CaCO_3 , NaNO_3 , KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{N}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Проведен подбор составов, оптимизирован температурный режим обжига и исследовано влияние вводимых компонентов на температурный интервал спекания. Установлено, что введение буры позволяет существенно снизить температуру спекания до 700–600 °С за счёт понижения вязкости расплава и предотвращения растрескивания. Исследованы физико-механические свойства образцов с использованием абразивных наполнителей – электрокорунда и карбида кремния. Проведены испытания на водопоглощение, пористость, кажущуюся плотность, истираемость и прочность при изгибе. Показано, что образцы на основе разработанной связки обладают характеристиками: прочность до 4,96 МПа при использовании карбида кремния, низкое водопоглощение до 10–14 %, высокая плотность равная 2,01–2,03 г/см³. Это делает их перспективными для применения в абразивном инструменте для наружного и плоского шлифования. Разработанная связка обеспечивает формирование прочной пористой структуры, устойчивой к истиранию и механическим нагрузкам, а также стабильной в условиях термического воздействия. Полученные результаты открывают возможности для применения данной связки в производстве энергоэффективного абразивного инструмента с расширенным диапазоном применения. В условиях современных технологических требований к экологичности и ресурсоэффективности производства, разработанная керамическая система может служить основой для создания новых поколений абразивных материалов с заданными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: керамическая связка, абразивный инструмент, абразивные материалы, низкотемпературное спекание, пористость, истираемость..

Введение.

Для повышения технологической эффективности процессов шлифования и обеспечения стабильного качества обрабатываемой поверхности всё шире внедряется методика высокоскоростной обработки. Применение высоких скоростей резания не только увеличивает производительность, но и способствует повышению стойкости абразивного инструмента и его режущей способности. Ключевой характеристикой данной технологии является линейная скорость вращения шлифовального круга, превышающая 60 м/с [1].

Одним из стратегических направлений повышения механической прочности абразивных материалов является использование модифицирующих добавок, способствующих формированию новых фаз при термическом воздействии, обладающих высокой прочностью и стабильностью. Создание легкоплавких стёкол основано на ряде принципов: частичная замена кремнезёма на борный ангидрид, замена стеклообразующих оксидов на аналоги с большей атомной массой или меньшей валентностью (при неизменном содержании кислорода), а также увеличение общей насыщенности системы кислородом [2,3].

Важной задачей является разработка керамических связок с низкой температурой спекания

(500–700 °С), позволяющих получать качественные абразивные материалы. Снижение температуры спекания основы с внедренными зёрнами абразива должно способствовать образованию качественного покрытия шлифовальной поверхности. Целью проводимых исследований являлось получение различных связок при снижении температуры образования стеклофазы и перехода связки в расплав, а также дальнейшее использование полученных связок для получения абразивного материала.

Одним из наиболее широко применяемых типов связок в производстве абразивного инструмента является керамическая, представляющая собой смесь тонкодисперсных неорганических компонентов, таких как кварцевый песок, каолин, полевой шпат и ряд других минералогических добавок [4]. Существующим связкам присуща хрупкость, ограничивающая их стойкость к ударным нагрузкам. Вместе с этим, керамические связки обладают совокупностью важных эксплуатационных характеристик, таких как высокая прочность, термостойкость, химическая инертность, водостойкость, жесткость и развитая пористая структура, обеспечивающая эффективный отвод тепла в процессе резания.

В процессе охлаждения и кристаллизации происходит формирование прочной монолитной

структуры, в которой абразивные зерна фиксируются в стекловидной матрице сложного минерального состава как за счет механического захвата, так и посредством химической связи [5,6]. При этом в стекло могут внедряться нерасплавленные частицы огнеупорной глины, играющие роль структурного каркаса. Образующийся керамический черепок содержит систему пор, что положительно влияет на теплопровод и режущие свойства. Предпочтительно формирование мелкокристаллической структуры, поскольку она снижает внутренние напряжения и способствует увеличению механической прочности материала.

В ряде исследований [7] изучались композиции, демонстрирующие повышенную реакционную способность и сниженный температурный интервал плавления. Получение керамической связки осуществляли методом фриттования: смешивание компонентов в шаровой мельнице, последующее спекание при контролируемой температуре, дробление фритты на щековой дробилке, повторное измельчение и фракционирование через сито с размером ячеек 0063.

По состоянию на конец 2022 года доля шлифовальных инструментов на основе карбида кремния достигала 26% от общего объема абразивных изделий, изготовленных с использованием керамических связок. Несмотря на относительно низкие показатели механической прочности, изделия на основе SiC активно применяются в производстве благодаря их высокой твердости и термостойкости [8,9]

Низкая прочность таких изделий обусловлена слабым межфазным взаимодействием между зёрнами SiC и керамической матрицей, а также склонностью карбида кремния к окислению при температуре выше 900 °C. На поверхности абразивных зёрен образуется тонкая плёнка диоксида кремния (SiO₂), сопровождающаяся выделением CO₂, что нарушает сцепление и снижает эксплуатационные характеристики инструмента.

При термическом воздействии в окислительной среде уже при температуре 600–750 °C SiC подвергается разрушению. При недостатке кислорода наблюдается образование углеродсодержащей плёнки, ухудшающей адгезию между зёрнами и связкой, что визуально проявляется как потемнение или «зауглероживание» изделия [10]. Также могут образовываться элементарный кремний и углерод в различных фазовых состояниях.

Во время высокотемпературной обработки абразивных изделий в керамической системе протекают различные физико-химические процессы: дегидратация, разрушение химически

сложных компонентов, плавление низкотемпературных фракций и последующее взаимодействие расплава с зёрнами абразива [11].

При нагреве до температуры около 650 °C в керамических системах на основе оксида алюминия (электрокорунда), модифицированных щелочными оксидами, начинается активное формирование жидкой фазы. Эта фаза частично растворяет поверхность абразивных зёрен и способствует их переносу в расплав. При дальнейшем повышении температуры до 1100 °C активизируются процессы минералообразования, сопровождающиеся увеличением вязкости расплава вследствие диффузии Al₂O₃ с поверхности зёрен в стеклообразную фазу [12,13].

Составы керамических связок разрабатываются с учетом совокупности требований: достаточной хрупкости для самозатачивания зёрен заполнителя, высокой прочности, адгезии к абразиву, твердости, способности контролировать вязкость системы при обжиге и обеспечивать нужные минеральные превращения в заданных температурных интервалах. Подбор компонентов осуществляется на основе их химико-минералогических характеристик, с целью формирования стеклообразной фазы определённого состава и свойств [14,15].

На практике применяется широкий спектр керамических связок, классифицируемых в зависимости от температуры спекания и типа абразива. Для электрокорундовых материалов преимущественно используют связки типов K1, K2, K4, K5, K6, K8, K43, тогда как для карбидокремниевых – K3, K10. Связки могут быть высокотемпературными (спекаемыми при 1200 °C и выше), полуспекаемыми низкотемпературными, а также плавящимися – на основе борного стекла, бариевого стекла или литий-боросиликатного стекла с добавками фторсодержащих соединений. Последние характеризуются повышенной прочностью и пригодны для применения в условиях высокоскоростной резки (до 80 м/с и выше) [16, 17].

В таблице 1 представлены составы и температурные характеристики наиболее распространённых типов керамических связок.

Для формования абразивных инструментов использовалась композиционная масса, включающая абразивное зерно, керамическую связку и увлажняющий агент. Прессование осуществлялось при давлении 14–15 МПа, после чего следовали этапы сушки и термической обработки при температуре 1050 °C с выдержкой в течение 1 часа. Разработанные шлифовальные круги предназначались для эксплуатации в режиме высокоскоростной обработки (≥ 60 м/с) на производственных мощностях ОАО «Минский подшипниковый завод».

Таблица 1

Химический состав наиболее распространенных керамических связок

Марка связки	Химический состав, %								
	SiO ₂ , в пределах	Al ₂ O ₃ , в пределах	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	B ₂ O ₃ , в пределах	BaO в пределах	K ₂ O, в пределах	K ₂ O/Na ₂ O не менее
			не более						
K1	61–66	14–20	5,0	1,0	3,0	–	–	8–10	1,0
K2	52–56	35–38	1,0	1,5	1,0	–	–	–	–
K3	60–55	19–24	1,0	1,0	1,5	–	–	7–8	1,0
K4	58–64	17–21	1,5	1,0	2,0	4–6	–	5–6	1,0
K5	60–66	14–17	1,5	1,0	4,0	5–6	–	5–6	1,0
K6	60–65	16–20	1,0	1,0	2,0	–	3,0	12–15	1,0
K8	55–60	20–25	1,0	1,0	5,0	–	–	4–5	1,0

Многие предприятия по производству абразивных материалов проводят исследования по получению улучшенных связок для производства различных видов абразивных материалов. Экспериментальные данные показали, что при увеличении содержания связки в формовочной массе на 2 % линейная усадка возрастает на 0,17 %. Объемное содержание абразивных зерен составляло 51 %, что соответствует структуре №7 по ГОСТ 52588-2011. В рамках технологических разработок Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины были изготовлены абразивные инструменты с повышенными эксплуатационными характеристиками [18].

Результаты сравнительных испытаний подтвердили превосходство разработанных изделий: шлифовальные круги, изготовленные по данной технологии, демонстрировали в 2–5 раз большую стойкость по сравнению с промышленными аналогами. Продукция, использовавшаяся при испытаниях, превзошла по режущей способности изделия производства ОАО «Волжский абразивный завод» в 4 раза.

Разложение карбида кремния – неизбежный аспект технологического цикла при производстве абразивных изделий с керамической связкой. Важными параметрами являются степень и глубина разложения, а также влияние состава связки и режима обжига на этот процесс [19, 20].

Одним из решений этой проблемы является обжиг в инертной или восстановительной атмосфере (например, в среде азота), однако такая технология сложно реализуема на производственных линиях.

В результате лабораторных исследований была разработана модифицированная керамическая связка с улучшенными огнеупорными характеристиками и температурой начала размягчения в диапазоне 1410–1430 °С. Увеличение

доли Al₂O₃ и SiO₂ в составе связки позволяет повысить вязкость расплава, что снижает вероятность образования дефектов [21].

Температурный порог появления поверхностных дефектов зависит от фракции SiC: чем больше размер зерна, тем выше пористость изделия и, соответственно, вероятность вспенивания и «зауглероживания». Установлено, что при добавлении 10 % MgO прочность возрастает на 45%, а введение 10 % CaCO₃ обеспечивает прирост прочности до 80 %, одновременно подавляя разложение SiC. Эти добавки формируют прочные межзеренные мостики, улучшают сцепление и снижают поверхностное натяжение стеклофазы [22, 23].

В связи с тем, что карбид кремния при температуре 900 °С интенсивно окисляется, целью проводимых исследований стала разработка низкотемпературной керамической связки для производства абразивных материалов.

Материалы и методы. Материалы. В индустрии производства абразивных материалов отсутствуют установленные стандарты или технические директивы, которые официально регламентировали бы качество сырьевых компонентов для создания керамических связок. В результате часто для изготовления таких связок используется сырье, применяемое в других областях промышленности, включая керамику, стекло и огнеупорные материалы. Эта практика сохраняется и в настоящее время из-за отсутствия соответствующей технической документации. Для производства новой керамической связки были использованы следующие сырьевые материалы:

1. Песок Карповского месторождения.

ОАО «Орловский комбинат нерудных материалов» реализует песок природный в г. Орле и Орловской области. Кварцевый песок является

основным компонентом для изготовления керамической связки, так как он образует «скелет» керамического изделия, выполняя структурную функцию, с целью ограничения и контроля изменения размеров конечного продукта, которое неизбежно при обжиге и сушке. Данный песок отвечает требованиям ГОСТ 8736-2014.

2. Сода кальцинированная техническая.

Техническая сода изготавливается исходя от назначения:

- марка А – для производства электровакуумного стекла и других целей;
- марка Б – используется в химической, стекольной и других отраслях промышленности.

Карбонат натрия служит флюсом для кремнезема, понижая температуру плавления диоксида кремния. При нагреве компонентов смеси происходит разложение карбонатов на оксиды металлов (Na_2O и CaO) и диоксид углерода (CO_2). Таким образом, карбонат натрия традиционно является источником оксида натрия.

Была подобрана техническая сода марки Б Березняковского завода со следующим составом: Na_2CO_3 – 99,0 %; Fe_2O_3 – 0,005 %; п.п.п. – 0,8 %.

3. Калий углекислый технический (поташ).

Введение поташа в массу, также, как и технической соды, положительно сказывается на снижении температуры плавления. Для изготовления керамической связки был подобран поташ 2 сорта предприятия АО «Пикалёвская сода» с химическим составом: K_2CO_3 – 94,3%, Na_2CO_3 – 1,5 %, SO_4 – 0,4 %, который отвечает требованиям ГОСТ 10690-73 «Калий углекислый технический (поташ). Технические условия».

4. Тетраборат натрия (бура).

Снижения температуры спекания добились заменой SiO_2 на B_2O_3 (вместо тетраэдров SiO_4 образуются треугольники B_2O_3).

Также для повышения механической прочности, адгезии к зерну и для создания композиции ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) – Al_2O_3 – B_2O_3 – SiO_2 в массу вводилась бура ($\text{N}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

Для керамической связки была подобрана бура 2 сорта ОАО «Буйский химический завод» с оксидным составом: B_2O_3 – 48 %, Na_2O – 21,37%, которая отвечает требованиям ГОСТ 8429-77 «Бура. Технические условия».

5. Нитраты натрия, калия и кальция (NaNO_3 , KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$).

Данное сырье может оказывать различное влияние на свойства керамической связки в зависимости от их концентрации и условий применения. Нитраты натрия, калия и кальция могут способствовать укреплению керамической связки за счет своего взаимодействия с другими компонентами материала. Они могут участвовать в образовании дополнительных химических связей, что

повышает прочность связки. Также они влияют на теплопроводность и термическую стабильность керамической связки. Они изменяют температурные характеристики материала и его способность выдерживать высокие температуры.

Для керамической связки были подобраны KNO_3 марки Б и $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ производства ОАО «Буйский химический завод», NaNO_3 марки Б от компании ООО «ХИМПЭЖ». Данное сырье соответствует ГОСТ Р 53949-2010 «Селитра калиевая техническая», ГОСТ 4142-77 «Кальций азотнокислый», ГОСТ 828-77 «Натрий азотнокислый технический».

6. Углекислый кальций.

Карбонат кальция может улучшить механические свойства керамической связки, такие как прочность и твердость. Он может способствовать образованию дополнительных химических связей, что делает материал более прочным. Добавление карбоната кальция может помочь контролировать пористость материала. Это особенно важно для керамических материалов, так как пористость может влиять на их механические свойства и способность удерживать жидкости. Добавление карбоната кальция может помочь контролировать усадку материала при обжиге, что важно для сохранения формы и размеров изделия.

Для изготовления керамической связки был подобран углекислый кальций предприятия АО «Мелстром», который соответствует ГОСТ 4530-76 «Кальций углекислый. Технические условия».

Также в качестве абразива с фракциями 160–125 мкм (12)* и 100–80 мкм (8)* были подобраны белый электрокорунд марки 25А, а также черный карбид кремния марки 54С.

*Номер зернистости по ГОСТ 3647-80.

Выбранные шлифовальные материалы соответствуют по показателям надежности ГОСТ 28118-90 «Материалы шлифовальные из электрокорунда. Технические условия» и ГОСТ 26327-84 «Материалы шлифовальные из карбида кремния. Технические условия».

Методы. Определение водопоглощения, открытой пористости и кажущейся плотности проводилось с помощью вакуумной камеры, соединенной через электромагнитный клапан с вакуумметром и вакуумным насосом. Расчет кажущейся пористости, водопоглощения и открытой пористости производился по классическим формулам.

Определение прочности образцов при изгибе проводилось на обожженных балочках. Для испытания обожженных керамических материалов на изгиб применялись рычажные установки

со съемными опорами, основанные на методе трехточечного нагружения образца.

Определение истираемости материалов в лабораторных условиях осуществлялось с использованием специальной машины, известной как круг истирания.

Подготовка сырьевых материалов проводилась в лабораторных условиях по классической схеме производства абразивного инструмента. Помол компонентов проводили в шаровой мельнице до остатка на сите 63 мкм 1–1,5 %. Далее компоненты смешивали и формовали образцы. Для интенсификации процесса спекания было решено вводить в массу буру, так как она способствует снижению температуры спекания, а также снижает вязкость расплава, препятствует расстеклованию. Это приводит к увеличению прочности, стойкости к механическому, химическому и термическому воздействию на готовые изделия.

Формование образцов осуществлялось на гидравлическом прессе при удельном давлении 20 МПа, толщина образца составила 7 мм. Начальная температура обжига образцов составила 1000 °С, далее путем изменения химического состава массы температуру спекания образцов снизили до 700–600 °С. Обжиг осуществлялся в муфельной печи.

Основная часть. Были составлены несколько масс из компонентов, процентное содержание которых позволяет скорректировать температуру спекания при изменении содержания количества легкоплавких оксидов в массе.

Разработанные составы приведены в таблице 2. Образцы из разработанных масс обжигали до полного спекания и получения стеклянного блеска. Температура образования достаточного количества стеклофазы приведена в таблице 2.

Таблица 2

Составы связок и температура начала спекания связок

№	Компоненты, %								Температура спекания, °С
	SiO ₂	Na ₂ CO ₃	NaNO ₃	KNO ₃	K ₂ CO ₃	CaCO ₃	Ca(NO ₃) ₂	Бура (N ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O)	
1	60,6	24,3	–	–	–	15,1	–	–	1010–1200
2	60	24	–	–	–	15	–	1	1000–1180
3	60	24	–	–	–	14	–	2	990–1160
4	60	24	–	–	–	13	–	3	980–1160
5	60	24	–	–	–	11	–	5	950–1130
6	50	20	–	–	10	15	–	5	900–1000
7	60	–	20	10	–	–	–	10	950–1050
8	50	15	–	–	10	15	–	10	850–950
9	50	10	–	–	15	20	–	5	950–1000
10	50	15	–	–	20	10	–	5	800–900
11	50	20	–	–	20	5	–	5	750–800
12	50	15	–	–	20	5	–	10	750–800
13	50	–	20	20	–	–	–	10	850–900
14	50	–	15	10	–	–	15	10	850–900
15	50	–	10	20	–	–	5	10	800–850
16	60	10	–	–	15	5	–	10	850–900
17	50	15	–	–	20	–	–	15	600–700
18	50	20	–	–	20	–	–	10	800–850
19	50	15	–	–	25	–	–	10	600–700

Из анализа полученных температур спекания образцов, можно сделать вывод, что составы масс 17 и 19 являются самыми подходящим, т.к. температура спекания и перехода в пиропластическое состояние составляет 600–700 °С.

Далее оптимальным составам присвоили индексы 1 (17) и 2 (19), и использовали как основную связку для получения шлифовальных элементов с добавлением заполнителя карбид кремния (1) и электрокорунда (2).

Вторым этапом стало получение готового материала. В качестве абразивных заполнителей для керамических связок были подобраны карбид кремния и электрокорунд (белый) с фракциями 160–125 мкм (12) и 100–80 мкм (8).

Разработанные составы связок и заполнители смешивались в соотношении 1:1:1 (связка:заполнитель (12):заполнитель (8)). Формование образцов размером 15×60×8 мм проводилось на лабораторном гидравлическом прессе при давлении прессования 20 МПа.

Обжиг осуществлялся при температуре 625–650 °С с выдержкой при максимальной температуре 30 минут, далее готовые образцы подвергались дальнейшим испытаниям.

Результаты первых испытаний приведены в таблице 3, а также представлены на диаграммах рисунков 1 и 2.

Таблица 3

Определение водопоглощения, пористости и кажущейся плотности образцов

№ связки	Водопоглощение, %	Пористость, %	Плотность кажущаяся, г/см ³
Заполнитель – карбид кремния (1)			
1.1	14,86	28,83	1,94
2.1	10,40	21,12	2,03
Заполнитель – электрокорунд (2)			
1.2	18,55	35,51	1,92
2.2	15,37	30,78	2,01

Испытания на прочность при изгибе показали, что образцы с использованием связки и заполнителя SiC обладают наивысшими значениями предела прочности – 4,94 и 4,99 МПа, соответственно. Это свидетельствует о формировании прочной, однородной структуры после обжига. Напротив, образцы с использованием заполнителя электрокорунда, продемонстрировали значительно меньшие значения прочности (2,31

и 2,78 МПа), что может быть связано с повышенной пористостью и менее плотной упаковкой компонентов связки. Таким образом, выбор состава связки и заполнителя существенно влияет на механическую прочность полученного абразивного материала.

Результаты испытаний приведены в таблице 5.

Таблица 5

Определение прочности при изгибе образцов абразивного материала

№ связки	Предел прочности при изгибе, МПа
1.1	4,94
2.1	4,99
1.2	2,31
2.2	2,78

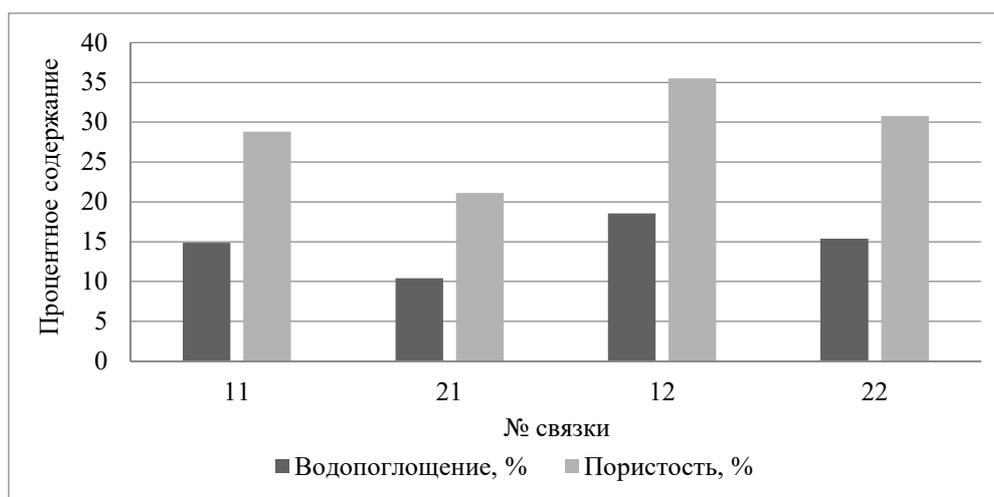


Рис. 1. Изменение водопоглощения и пористости в зависимости от изменения состава

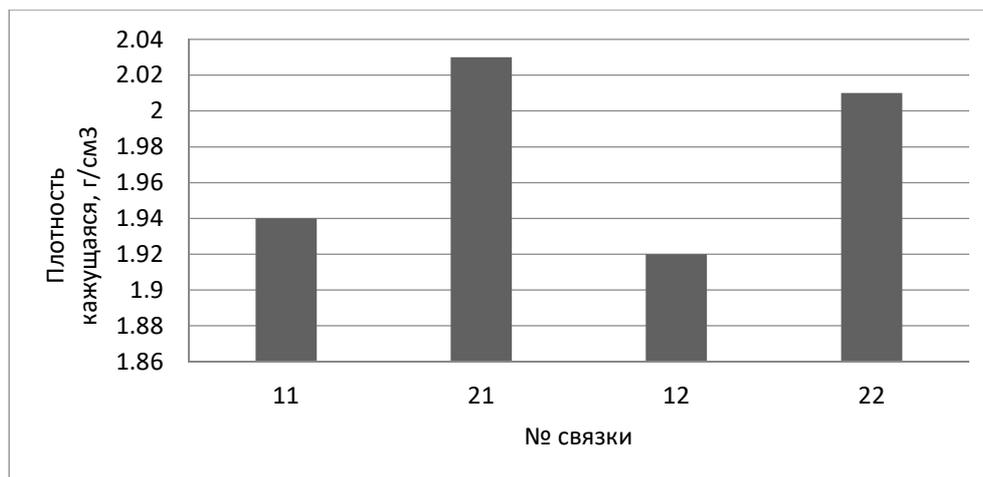


Рис. 2. Изменение кажущейся плотности в зависимости от изменения состава

Исходя из диаграмм, можно сделать вывод, что образцы на основе 2 связки имеют наименьшую пористость и водопоглощение, которая положительно сказывается на структуре инструмента, предназначенного для круглого наружного шлифования, заточки инструментов, а также на плоском шлифовании периферией круга.

При испытаниях на истирание было установлено, что образцы, содержащие связку 2, демонстрируют наименьшую массу потерь при контролируемом абразивном воздействии, что свидетельствует о их высокой износостойкости. В то же время образцы на основе связки 1 показали значительно большую истираемость, что указывает на менее прочную структуру и пониженную устойчивость к абразивной нагрузке. Полученные данные подтверждают зависимость истираемости от состава связки и степени спекания [23].

Результаты испытаний приведены в таблице 4.

Таблица 4

Определение истираемости абразивного материала

№ связки	Площадь образца, см ²	Истираемость, г/см ²
1.1	25,0	0,024
2.1	25,0	0,012
1.2	25,0	0,26
2.2	25,0	0,048

В ходе испытаний было выявлено, что керамическая связка №2 обладает высокими эксплуатационными характеристиками и универсальна в применении как с электрокорундом, так и с карбидом кремния. Внешний вид образцов представлен на рисунке 3.

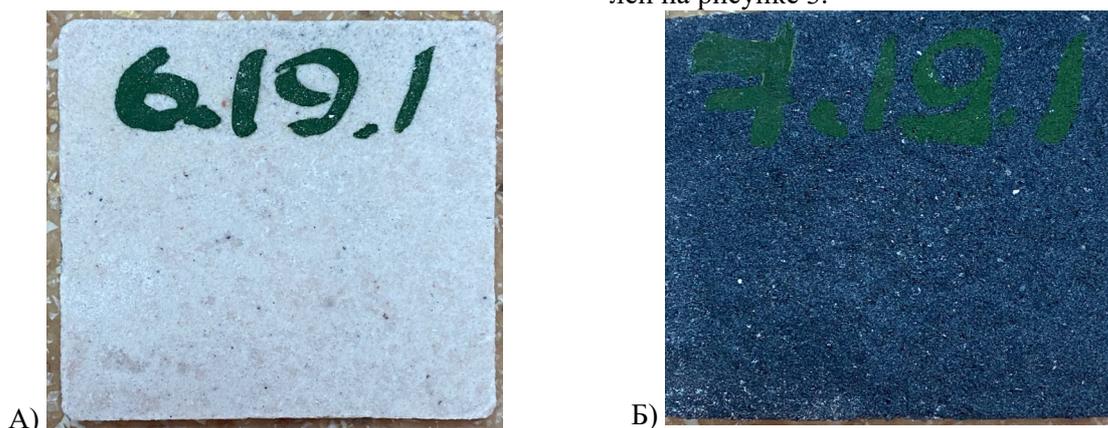


Рис. 3. Внешний вид материала на основе связки № 2 с наполнителем:

а) электрокорунд; б) карбид кремния

Выводы. Проведенные исследования материала на основе электрокорунда показали, что все значения физико-механических свойств соответствуют требованиям применяемого ГОСТа: водопоглощение – 15,37%, кажущаяся плотность – 2,01 г/см³, общая пористость – 30,78%, прочность при изгибе – 2,54 МПа. При использовании

наполнителя – карбида кремния, наблюдается более плотное спекание, материал характеризуется снижением водопоглощения до 10,40%, увеличением плотности до 2,03 г/см³ и уменьшением пористости до 21,12%, при этом прочность возрастает до 4,96 МПа.

Таким образом, связка №19 демонстрирует эффективное сочетание механической прочности, оптимальной пористости и технологичности, что позволяет применять её в абразивных инструментах различного назначения. Дополнительным достоинством разработанной керамической связки является пониженная температура обжига (625–650 °С), что обеспечивает снижение энергозатрат и способствует уменьшению экологической нагрузки на производственные процессы.

Полученные результаты подтверждают потенциал данной связки для использования в производстве энергоэффективного абразивного инструмента с широким спектром применения. Учитывая актуальные требования к экологической и ресурсоэффективности технологических процессов, предложенная керамическая система представляет собой перспективную основу для разработки новых поколений абразивных материалов с заданными эксплуатационными свойствами. Это открывает возможности её применения в различных отраслях промышленности, предъявляющих высокие требования к износостойкости и универсальности абразивных инструментов, в том числе, при работе с такими наполнителями, как электрокорунд и карбид кремния.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галимов Э.Р., Абдуллин А.Л. Современные конструкционные материалы для машиностроения: учебное пособие. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2020. 268 с.
2. Пащенко А.А., Емельянов Б.М., Шило А.Е. Взаимодействие алмаза, кубического нитрида бора и графита с расплавами стекла // Доклады Академии наук СССР. 1970. Т. 190. № 3. С. 645–647.
3. Лавров Р.В., Климкин Е.Г., Новиков Л.Б. Использование гидроксида натрия для получения стекловидных щелочных силикатов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2019. № 7. С. 95–101. DOI: 10.34031/article_5d35d0b7196335.34243152.
4. Горбунов А.В., Лебедев В.А., Лебедева Е.В. Технология и оборудование производства абразивных материалов. М.: Машиностроение, 2021. 39 с.
5. Михайлов В. А., Кузнецов В. В., Лебедев В. А. Исследование и разработка составов керамической связки для производства абразивных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. 72 с.
6. Бакуль В.Н. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / под ред. В. Н. Бакуля. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.
7. Патент № 2278773, Российская Федерация. МПК В24Д 3/00 (2006.01). Связанный абразивный инструмент и способы шлифования с его использованием: № 2004128330/02; заявл. 23.09.2004; опубл. 20.06.2006 / Боннер Э. М., Брайт Э., Ламберт Э. Л., Матсумото Д. С., Орлхэк К., Шелдон Д. А. 11с.
8. Zicari F., Traini T., Perfetti G., De Lillo A., Di Iorio D., Caputi S. Bonding Effectiveness of Veneering Ceramic to Zirconia after Different Grit-Blasting Treatments // Dentistry Journal. 2024. Vol. 12. No. 7. 219. DOI: 10.3390/dj12070219.
9. Tanska J., Stepniowski W.J., Kurzydłowski K.J. Digital Light Processing Followed by Pressureless Sintering of Metal-Reinforced Ceramics: Adjustment of Process Parameters and Correlation with Composites Properties // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing–Green Technology. 2024. DOI: 10.1007/s40684-024-00684-y.
10. Минько Н.И., Лавров Р.В. Гидроксид натрия в стекольной технологии // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2011. № 3. С. 53–57.
11. Zhang H., Wang Z., Liu Z., Bai Y., Zhang R. Review on Abrasive Machining Technology of SiC Ceramic Composites // Micromachines. 2024. Vol. 15. No. 1. 106. DOI: 10.3390/mi15010106.
12. Behera R.P., Panda S.K., Mishra S., Rajan K.K., Pandey B.P. Effect of interfacial Fe₃O₄ nanoparticles on the microstructure and mechanical properties of textured alumina densified by ultrafast high-temperature sintering // Journal of the European Ceramic Society. 2024. Vol. 44, No. 9. 116696. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116696
13. Peters A.B., Ebner J., Landgraf R., Greil P., Travitzky N. Reactive two-step additive manufacturing of ultra-high temperature carbide ceramics. arXiv preprint. 2022. arXiv:2208.00052. DOI: 10.48550/arXiv.2208.00052.
14. Сафронова Т.В., Шаталова Т.Б., Филиппов Я.Ю., Тошев О.У., Кнотько А.В., Ваймутин Л.А., Савченкова Д.В. Керамика в системе Na₂O–CaO–SO₂ как перспективный неорганический пороген // Стекло и керамика. 2022. Т. 95. № 3. С. 9–18. DOI: 10.14489/glc.2022.03.pp.009-018
15. Горелов А.А. Особенности механической обработки деталей из керамических материалов // Известия МГТУ МАМИ. 2022. № 2(54). С. 43–47. DOI: 10.17816/2074-0530-68420
16. Сироткин О. С. Основы современного материаловедения. М.: ИНФРА-М, 2021. 352 с.

17. Ковальчук Ю.М. Развитие производства абразивного, алмазного и эльборного инструмента. М.: Машиностроение, 1976. 32 с.

18. Сулейманова Л.А. Высококачественные энергосберегающие и конкурентоспособные строительные материалы, изделия и конструкции // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 1. С. 9–16. DOI: 10.12737/22637

19. Морозов А.П. Исследование процесса плоского периферийного шлифования кругом с лазерной дискретизацией режущей поверхности: дис. канд. техн. наук. Владимир, 2010. 214 с.

20. Эфрос М.Г., Миронюк В.С., Брянцев Б.А. Керамическая связка для инструмента из эльбора // Химия и технология силикатных материалов: сб. науч. ст. Л.: Наука, 1971. С. 17–23.

21. Янссон М., Юргенс Б., Кляйн Б. Поведение органических связующих при низкотемпературном спекании керамики // Технология керамики. М.: Мир, 1986. С. 99–106.

22. Куликов А. С., Чирков С. В. Исследование термического поведения компонентов керамической связки при обжиге // Вестник Томского политехнического университета. 2018. Т. 329. № 7. С. 49–54.

23. Bai Y., Wang Z., Zhang H., et al. Effect of Different Vitrified Bonds on Grinding Performance of Diamond Wheels for Optical Glasses // Ceramics International. 2023. Vol. 49. No. 20. Pp. 31321–31331. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.06.069.

Информация об авторах

Смагина Анна Романовна, магистр кафедры технология стекла и керамики. E-mail: smaginaa9@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Трепалина Юлия Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: yliaalin@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Трепалин Дмитрий Викторович, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: extrepalin@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мишин Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: mishinda.xtasm@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сыса Оксана Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: sysa1975@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 12.05.2025 г.

© Смагина А.Р., Трепалина Ю.Н., Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Сыса О.К., 2025

***Smagina A.R., Trepalina Yu.N., Trepalin D.V., Mishin D.A.**
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
*E-mail: smaginaa9@mail.ru

DEVELOPMENT AND STUDY OF A CERAMIC BOND FOR ABRASIVE TOOL MANUFACTURING

Abstract. This paper presents the results of the development and investigation of ceramic bonds based on low-melting compounds such as Na_2CO_3 , K_2CO_3 , CaCO_3 , NaNO_3 , KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, and borax. The compositions were selected, the firing temperature regime was optimized, and the influence of the introduced components on the sintering temperature range was studied. It was found that the addition of borax significantly reduces the sintering temperature to 700–600 °C by lowering the melt viscosity and preventing devitrification. The physico-mechanical properties of the samples were studied using abrasive fillers such as electrocorundum and silicon carbide. Tests were carried out for water absorption, porosity, apparent density, abrasion resistance, and flexural strength. It was shown that samples based on the developed bond exhibit the following characteristics: flexural strength up to 4.96 MPa when using silicon carbide, low water absorption, and high

density, which makes them promising for use in abrasive tools for external and surface grinding. The developed bond ensures the formation of a strong porous structure that is resistant to wear and mechanical loads, and stable under thermal exposure. The obtained results open up prospects for the use of this bond in the production of energy-efficient abrasive tools with an extended range of applications. In the context of modern technological requirements for environmental and resource efficiency, the developed ceramic system can serve as a basis for creating a new generation of abrasive materials with targeted performance characteristics.

Keywords: ceramic bond, abrasive tool, abrasive materials, low-temperature sintering, porosity, abrasion resistance.

REFERENCES

- Galimov E.R., Abdullin A.L. Modern Structural Materials for Mechanical Engineering: Textbook. [Sovremennye konstruksionnye materialy dlya mashinostroeniya: uchebnoe posobie]. 3rd ed., revised. St. Petersburg: Lan, 2020. 268 p. (rus)
- Pashchenko A.A., Emelyanov B.M., Shilo A.E. Interaction of Diamond, Cubic Boron Nitride and Graphite with Glass Melts. [Vzaimodeystvie almaza, kubicheskogo nitrida bora i grafita s rasplavami stekla]. Doklady Akademii Nauk SSSR. 1970. Vol. 190, No. 3. P. 645–647. (rus)
- Lavrov R.V., Klimkin E.G., Novikov L.B. Use of Sodium Hydroxide for the Production of Glassy Alkaline Silicates. [Ispol'zovanie gidroksida natriya dlya polucheniya steklovidnykh shchelochnykh silikatov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 7. Pp. 95–101. (rus). DOI: 10.34031/article_5d35d0b7196335.34243152
- Gorbunov A.V., Lebedev V.A., Lebedeva E.V. Technology and Equipment for the Production of Abrasive Materials. [Tekhnologiya i oborudovanie proizvodstva abrazivnykh materialov]. Moscow: Mashinostroenie, 2021. 39 p. (rus)
- Mikhailov V.A., Kuznetsov V.V., Lebedev V.A. Research and Development of Ceramic Bond Compositions for Abrasive Material Production. [Issledovanie i razrabotka sostavov keramicheskoy svyazki dlya proizvodstva abrazivnykh materialov]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing, 2023. 72 p. (rus)
- Bakul V.N., Fundamentals of Design and Technology of Abrasive and Diamond Tools. [Osnovy proektirovaniya i tekhnologiya izgotovleniya abrazivnogo i almaznogo instrumenta]. edited. by V. N. Bakul. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 296 p. (rus)
- Bonded Abrasive Tool and Methods for Grinding Using It. [Svazannyy abrazivnyy instrument i sposoby shlifovaniya s ego ispol'zovaniem]: RU Patent No. 2278773 C2 Russian Federation. Appl. No. 2004128330/02; filed 23.09.2004; published 20.06.2006. Bulletin No. 17. (rus)
- Zicari F., Traini T., Perfetti G., De Lillo A., Di Iorio D., Caputi S. Bonding Effectiveness of Veneering Ceramic to Zirconia after Different Grit-Blasting Treatments. Dentistry Journal. 2024. Vol. 12, No. 7. 219. DOI: 10.3390/dj12070219.
- Tanska J., Stepniowski W.J., Kurzydłowski K.J. Digital Light Processing Followed by Pressureless Sintering of Metal-Reinforced Ceramics: Adjustment of Process Parameters and Correlation with Composites Properties. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing–Green Technology. 2024. DOI: 10.1007/s40684-024-00684-y.
- Minko N.I., Lavrov R.V. Sodium Hydroxide in Glass Technology. [Gidrokisid natriya v stekol'noy tekhnologii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2011. No. 3. Pp. 53–57. (rus)
- Zhang H., Wang Z., Liu Z., Bai Y., Zhang R. Review on Abrasive Machining Technology of SiC Ceramic Composites. Micromachines. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 106. DOI: 10.3390/mi15010106.
- Behera R.P., Panda S.K., Mishra S., Rajan K.K., Pandey B.P. Effect of Interfacial Fe₃O₄ Nanoparticles on the Microstructure and Mechanical Properties of Textured Alumina Densified by Ultrafast High-Temperature Sintering. Journal of the European Ceramic Society. 2024. Vol. 44, No. 9. 116696. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116696. (rus)
- Peters A.B., Ebner J., Landgraf R., Greil P., Travitzky N. Reactive Two-Step Additive Manufacturing of Ultra-High Temperature Carbide Ceramics. arXiv preprint. 2022. arXiv:2208.00052. DOI: 10.48550/arXiv.2208.00052.
- Safronova T.V., Shatalova T.B., Filippov Ya.Yu., Toshev O.U., Knotko A.V., Vaimugin L.A., Savchenkova D.V. Ceramics in the Na₂O–CaO–SO₃ System as a Promising Inorganic Pore Former. [Keramika v sisteme Na₂O–CaO–SO₃ kak perspektivnyy neorganicheskiy porogen]. Glass and Ceramics. 2022. Vol. 95, No. 3. Pp. 9–18. DOI: 10.14489/glc.2022.03.pp.009-018 (rus)
- Gorelov A.A. Features of Machining Parts Made of Ceramic Materials. [Osobennosti mekhanicheskoy obrabotki detaley iz keramicheskikh materialov]. Proceedings of Moscow State Technical University MAMI. 2022. No. 2(54). Pp. 43–47. DOI: 10.17816/2074-0530-68420 (rus)
- Sirotkin O.S. Fundamentals of Modern Materials Science. [Osnovy sovremennogo materialovedeniya]. Moscow: INFRA-M, 2021. 352 p. (rus)
- Kovalchuk Yu.M. Development of Abrasive, Diamond and Elbor Tool Production. [Razvitie proizvodstva abrazivnogo, almaznogo i el'bornogo

instrumenta]. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 32 p. (rus)

18. Suleymanova L.A. High-Quality Energy-Saving and Competitive Construction Materials, Products, and Structures [Vysokokachestvennye energosberegayushchie i konkurentosposobnye stroitel'nye materialy, izdeliya i konstruktsii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 1. Pp. 9–16. (rus). DOI: 10.12737/22637

19. Morozov A.P. Study of the Process of Surface Peripheral Grinding Using a Wheel with Laser Discretization of the Cutting Surface: Cand. Tech. Sci. Diss. [Issledovanie protsessa ploskogo periferinogo shlifovaniya krugom s lazernoy diskretizatsiyey rezhushchey poverkhnosti: dis.kand. tekhn. nauk]. Vladimir, 2010. 214 p. (rus)

20. Efros M.G., Mironyuk V.S., Bryantsev B.A. Ceramic Bond for Elbor Tools [Keramicheskaya svyazka dlya instrumenta iz el'bora]. In: Chemistry

and Technology of Silicate Materials: Collected Scientific Articles. Leningrad: Nauka, 1971. Pp. 17–23. (rus)

21. Jansson M., Jurgens B., Klein B. Behavior of Organic Binders During Low-Temperature Sintering of Ceramics. [Povedenie organicheskikh svyazuyushchikh pri nizkotemperaturnom spekanii keramiki]. In: Ceramic Technology. Moscow: Mir, 1986. Pp. 99–106. (rus)

22. Kulikov A. S., Chirkov S.V. Study of Thermal Behavior of Ceramic Bond Components During Firing. [Issledovanie termicheskogo povedeniya komponentov keramicheskoy svyazki pri obzhige]. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. 2018. Vol. 329, No. 7. Pp. 49–54. (rus)

23. Bai Y., Wang Z., Zhang H., et al. Effect of Different Vitrified Bonds on Grinding Performance of Diamond Wheels for Optical Glasses. Ceramics International. 2023. Vol. 49, No. 20. Pp. 31321–31331. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.06.069

Information about the authors

Smagina Ann R. Master of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: smaginaa9@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Trepalina Julia N. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: ylialin@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Trepalin Dmitry V. Postgraduate student of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: extrepalin@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Mishin, Dmitry A. PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Cement and Composite Materials Technology. E-mail: mishinda.xtsm@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Sysa, Oksana K. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: sysa1975@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 12.05.2025

Для цитирования:

Смагина А.Р., Трепалина Ю.Н., Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Сыса О.К. Разработка и исследование керамической связки для производства абразивного инструмента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 96–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-96-106

For citation:

Smagina A.R., Trepalina Yu.N., Trepalin D.V., Mishin D.A. Development and study of a ceramic bond for abrasive tool manufacturing. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 8. Pp. 96–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-96-106