Научная статья

УДК 621.923
DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-10-866-872

Композиционные шлифовальные круги с предельно высокими номерами структуры и условия их изготовления

Виктор Константинович Старков[1]✉, д-р техн. наук, **Жанна Владимировна Вараткова**[2]

[1] Москва, Россия, starkov.viktor@list.ru✉

[2] ООО "Волгашлиф Плюс", Рыбинск, Россия, volgashlif@mail.ru

Аннотация. Определены принципы формирования многокомпонентных составов абразивно-керамических композиций высокоструктурного инструмента и условия его адресного изготовления для высокопроизводительного шлифования.

Ключевые слова: шлифовальный круг, технологичность, структура и структурность, характеристика круга, абразив, зернистость, твердость, вариативность состава.

Для цитирования: Старков В. К., Вараткова Ж. В. Композиционные шлифовальные круги с предельно высокими номерами структуры и условия их изготовления // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104. № 10. С. 866—872. DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-10-866-872.

Original article

Composite grinding wheels with extremely high structure numbers and conditions for their manufacture

Viktor K. Starkov[1]✉, **Zhanna V. Varatkova**[2]

[1] Moscow, Russia, starkov.viktor@list.ru[1]✉

[2] OOO "Volgashlif Plus", Rybinsk, Russia, volgashlif@mail.ru

Abstract. The principles of formation of multicomponent compositions of abrasive-ceramic composites of a highly structured tool and conditions of its targeted production for high-performance grinding are determined.

Keywords: grinding wheel, manufacturability, structure and structurality, wheel characteristics, abrasive, grain size, hardness, composition variability.

Шлифование — наиболее перспективный и эффективный метод механической обработки, позволяющий за один установ детали (например, турбинной лопатки, зубчатого колеса и др.) выполнить полный цикл ее высокопроизводительного и качественного формообразования. Существенному развитию шлифования способствовало освоение автоматизированного многокоординатного и многофункционального станочного оборудования. Не менее важным фактором стало создание абразивного инструмента нового поколения — высокоструктурных ("высокопористых") шлифовальных кругов, повышенная работоспособность которых реализует технологический потенциал современного оборудования [1, 2].

В машиностроении в основном используются шлифовальные круги на керамических связках, работоспособность которых удалось заметно улучшить повышением структурности с № 5—6 до № 10 и более. Это стимулировало переориентацию абразивного производства на преимущественный выпуск высокоструктурного инструмента, в том числе и с целью импортозамещения [3]. На отечественных абразивных заводах доля высокоструктурного инструмента достигает 60 %, за рубежом — до 100 % от общего объема его изготовления.

Положительный эффект повышения структурности обусловлен формированием благоприятных физических условий для диспергирования обрабатываемого материала абразивными зернами инструмента. При повышении номера структуры круга количество зерен на его рабочей поверхности уменьшается, а расстояния между ними увеличиваются. Соответственно увеличиваются толщина стружки, удаляемой отдельным зерном, и вероятность того, что больше зерен преодолеет "порог резания" и будут выполнять полезную работу диспергирования. Количество режущих зерен при повышении структурности круга, например, от № 6 до № 20 возрастает с 10 до 92 %, существенно снижая давление на обрабатываемую поверхность детали и ее нагрев от абразивных зерен, не участвующих в резании [4, 5].

Круги с повышенной структурностью по сравнению с кругами нормальных структур (№ 5—9) позволяют повысить производительность бездефектного шлифования и износостойкость инструмента благодаря их более высокой твердости и применения форсированных режимов обработки с рабочей скорости до 100 м/с.

В промышленности больше востребован инструмент на основе традиционных абразивов — корунда и карборунда со структурами № 10—18, производство которого освоено в России. Известен опыт изготовления и применения шлифовальных кругов со структурой № 20 [1].

Через 100 лет после создания американской фирмой Norton общепринятой международной классификации по структурности абразивного инструмента в ООО "Волгашлиф Плюс" разработали и изготовили тестовый круг на керамической связке из электрокорунда с возможной структурой № 30. Таким образом, по структурности получили всю линейку возможных характеристик шлифовальных кругов по материалу абразива, его зернистости, а также твердости с учетом всех номеров для изучения и практического применения [5, 6].

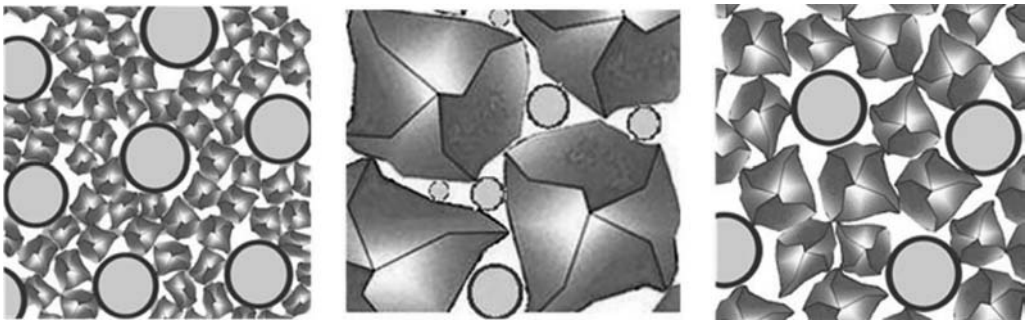
Составы высокоструктурных шлифовальных кругов. Современный шлифовальный круг — сложная и многокомпонентная объемная абразивно-керамическая композиция, основой которой является каркас из прочно скрепленных связкой однородно распределенных абразивных зерен. Прочность каркаса зависит от количественного соотношения зерна и связки, которое определяет твердость инструмента.

При увеличении структурности, например, с № 6 до № 10 и до предельного № 30 количество абразива в составе круга уменьшается на 8÷48 %. Освобождающийся в инструменте объем для технологичности изготовления и заданной работоспособности необходимо заполнить наполнителем — дополнительными компонентами. По функциональному назначению компоненты можно разделить на твердые компенсаторы абразивного зерна, сохраняющие свою форму и твердость при изготовлении инструмента, включая высокотемпературный обжиг, и выгорающие наполнители — порообразователи.

Компенсаторами абразива могут быть, например, полые частицы перлита, корунда, силиката и др. Для полых микросфер характерно сочетание их сферической формы и толщины стенки, которое обеспечивает достаточную прочность при гидростатическом сжатии формовочной массы с образованием дополнительных режущих кромок и пор на рабочей поверхности круга при его правке и шлифовании. Абразив заданной зернистости можно заменить абразивом аналогичного состава (марки), но меньших размеров.

На практике для создания дополнительной объемной пористости в инструменте применяют органические и неорганические выгорающие порообразователи. В первом случае — это размолотые до заданного размера фруктовые косточки (оливковые, персиковые и др.), во втором — нафталиновые сферические гранулы.

Молотые фруктовые косточки растительного происхождения нестабильны по своим свойствам, но экологичны в абразивном производстве. При введении в состав круга их большого количества (более 5 % об.) продукты выгорания разупрочняют керамическую связку. Нафталин как химический



а) *б*) *в*)

Рис. 1. Примеры составов высокоструктурных шлифовальных кругов

продукт стабилен по свойствам и размерам, но чрезвычайно токсичен для человека. Используется за рубежом только со специальными очистными системами.

Составы и свойства разных наполнителей и особенности их применения при изготовлении высокоструктурных шлифовальных кругов подробно описаны в работе [1].

На рис. 1 схематично показаны возможные варианты составов высокоструктурных кругов. С уменьшением количества абразивного зерна пропорционально повышается объемное содержание его компенсатора в виде микросфер и выгорающего порообразователя. В данном примере содержание керамической связки привязано к одной степени твердости, как и клеящих и увлажняющих добавок, а небольшое их увеличение соответствует более сложному по составу и количеству скрепляемых твердых частиц. На практике содержание связки в составе круга может изменяться от 5 % об. для весьма мягкой твердости F до 20 % об. для весьма твердой степени T, что потребует адресной трансформации предложенной схемы в связи с необходимостью повышения доли связки.

По составу и технологии изготовления шлифовальные круги с повышенной структурностью можно классифицировать как композиционный инструмент, абразивно-керамическая масса которого представляет собой керамическую матрицу, дисперсионно-упрочненную твердыми частицами двух и более видов, разнородных по форме, размерам и физико-химическим свойствам.

Состав и свойства высокоструктурных кругов

Состав и свойства	Номер структуры		
	10	20	30
Количество, % об.:			
абразива	42	22	2
связки	10	12	13
Соотношение абразивных зерен и силикатных микросфер	19:1	2:10	1:10
Степень разноплотности состава	0,89	0,45	0,33
Потеря массы при обжиге, % об.	2,0	4,3	27,6
Плотность круга, г/см^3	1,95	1,57	0,73
Твердость круга по ЗИ	K	I	H
Расчетная пористость, % об.	48	56	85

В таблице приведены состав и свойства шлифовальных кругов типоразмера 1 200 × 30 × 32, изготовленных из электрокорунда белого марки 25А зернистостью F150 на керамической связке марки К5 со структурами № 10, 20 и 30 и наполнителем в виде силикатных микросфер и молотых фруктовых косточек. Предложенные составы обеспечивают технологичность изготовления опытных образцов инструмента и, прежде всего, по наиболее критичному параметру — объемной усадке при высокотемпературном обжиге. Значения ее не превышали допустимых величин для сохранения исходной структурности соответственно 2,32, 4,35 и 33,33 % [6].

Твердость кругов определяли акустическим методом по величине звукового индекса (ЗИ) в соответствии с ГОСТ Р 52710—2007.

В результате включения в состав круга твердых частиц наполнителя с размерами, меньшими размера базового зерна абразива, принципиально изменяется численное соотношение между ними. Если при структуре № 10 на 19 абразивных зерен приходится одна частица наполнителя, то при структуре № 30 приходится 10 твердых частиц на одно зерно. В связи с этим устойчивость объемного каркаса инструмента к усадке при обжиге и его разрывная прочность становятся более зависимыми от условий формирования связи твердых частиц компенсатора между собой, чем от прочности связи между абразивными зернами.

Соотношение числа абразивных зерен и твердых частиц наполнителя в большей степени зависит от размера зерен, чем от их количества. В таблице приведена их величина для зернистости F150, на практике в инструменте со структурой № 10 обычно используется зернистость F80, при которой указанное соотношение равно 2:1.

С увеличением структурности инструмента уменьшается разноплотность его состава, которая определяется среднеквадратичным отклонением относительных долей объема с разной плотностью, изменяющейся в диапазоне 0,2÷3,95 г/см^3. Для разработанного состава круга со структурой № 30 плотность в 2,7 раз меньше, чем для состава круга со структурой № 10, что является предпосылкой для изготовления высокоструктурного круга с минимальной неуравновешенностью масс.

Уменьшение плотности кругов с 1,95 до 0,73 г/см^3 с увеличением их структурности объясняется сопутствующим повышением объемного содержания легких невыгорающих микросфер разного состава. Введение пустотелых микросфер с "закрытой" пористостью в сочетании с порами, образующимися от выгорания молотых фруктовых косточек, позволило повысить расчетную пористость круга до 85 %.

При изготовлении тестовых кругов была выявлена особенность формирования их твердости: с увеличением структурности и количества вводимой связки твердость заметно уменьшилась, а не увеличилась вопреки ожиданиям.

Разработка составов высокоструктурных кругов. Изготовление абразивного инструмента на керамических связках с нормальными структурами основано на использовании простых композиций "зерно — связка" с клеящими и увлажняющими добавками для повышения прочности формуемых заготовок перед их сушкой и обжигом. При выбранном материале абразива, его зернистости и количестве в соответствии с номером структуры назначается объемное содержание связки, количество которой определяет твердость шлифовального круга.

Твердость для абразивного инструмента принята как синоним прочности удержания абразивных зерен керамической связкой. Прочность их соединения зависит от многих факторов, но основным является зазор между соседними зернами, в котором при обжиге заготовки круга образуется мостик связи между зернами и затвердевающей керамической связкой. Чем меньше зазор, тем благоприятней условия формирования прочности объемного каркаса абразивно-керамической композиции.

Расчетная оценка показала, что, например, при структурах № 6—9 средний зазор между соседними зернами в круге с зерном из электрокорунда белого зернистостью F80—F150 не превышает половины среднего размера зерна. С учетом статистического распределения расстояний между зернами по экспоненциальному закону большая их часть будет находиться в непосредственном контакте друг с другом, что облегчает их прочное соединение связкой.

С увеличением структурности кругов до № 30 ситуация кардинально меняется: зазоры между зернами увеличиваются до 6 раз, и в них могут разместиться до четырех аналогичных зерен. Безусловно, создание состава высокоструктурного инструмента повышенной прочности невозможно без "посредников" в виде твердых частиц наполнителя, обеспечивающих заданную твердость соединения рабочих абразивных зерен.

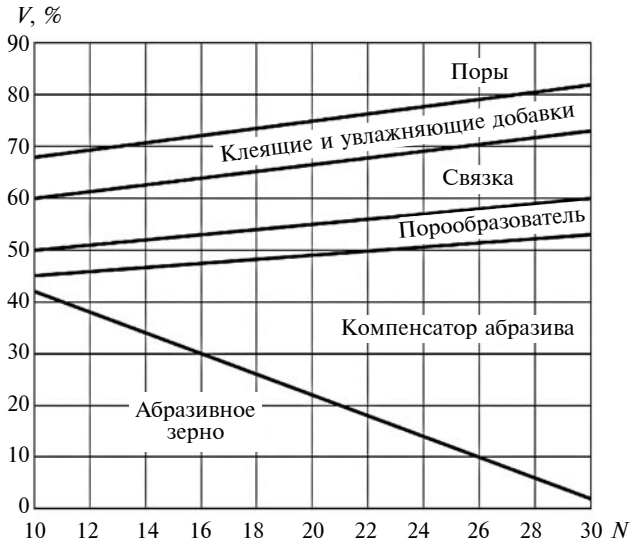


Рис. 2. Объемное соотношение компонентов кругов с разной структурностью *N*

На рис. 2 показано возможное объемное соотношение компонентов в составе абразивных инструментов с номерами структур от № 10 до № 30.

Повышение твердости инструмента с нормальной структурой от F до Q связано линейной зависимостью с пропорциональным увеличением объема связки, вводимой в состав с небольшой коррекцией в пределах 5÷8 % при изменении зернистости абразива и его количества. Для шлифовального круга с повышенной структурностью установлена противоположная тенденция: при увеличении связки на 20 и 30 % для кругов структур № 20 и № 30 относительно круга со структурой № 10 твердость уменьшилась с K соответственно до I и H (см. таблицу).

Чтобы установить механизм формирования твердости многокомпонентного состава инструмента выполнили его моделирование с учетом пространственного распределения абразива и твердых частиц наполнителя. Моделирование проводили по формулам работы [1], которые позволяют рассчитать общее количество зерен абразива и частиц наполнителя в 1 мм^3 состава и оценить среднее расстояние между поверхностями, соединяемыми керамической связкой. Объем связки с известной плотностью, вводимый в состав, распределяется на количество зерен и твердых частиц наполнителя

с последующим определением диаметра мостика связи. На рис. 3 показано изменение средних расстояний l_k для суммарного количества абразивных зерен и твердых частиц наполнителя и диаметров d_m мостиков связи между ними.

Отметим важный момент в моделировании — большую разницу количества абразива разной зернистости в одинаковом насыпном объеме: в кругах со структурностью от № 10 до № 30 количество абразива зернистостью F150 было почти в 10 раз больше, чем абразива зернистостью F80. С увеличением структурности объем кругов, освобождающийся от абразива, заполнялся полыми сферическими частицами одного размера. Соотношение между количеством абразива и частицами наполнителя изменилось до 1:10 для зернистости F150 и до 1:110 для зернистости F80.

В результате для кругов со структурой № 30 и зернистостью F150 суммарное число твердых частиц зерна и наполнителя уменьшилось в 1,9 раз, а для кругов зернистостью F80 увеличилось в 3,3 раза. В первом случае расстояние между ними увеличилось, во втором — уменьшилось. В итоге обе характеристики оказались практически одинаковыми, как и диаметр мостика связи между зернами. Получены предпосылки изготовления инструмента с высокой структурностью одной твердости.

При исследовании тестовых кругов (см. таблицу) установили влияние пространственных характеристик составов высокоструктурных кругов через диаметр мостика связи твердых компонентов на их твердость, измеренную акустическим методом. Опытные данные использовали для расчета твердости инструмента из электрокорунда белого зернистостью F150 в зависимости от структурности круга и количества связки в % объема (рис. 4). Для сложного и переменного в зависимости от структуры

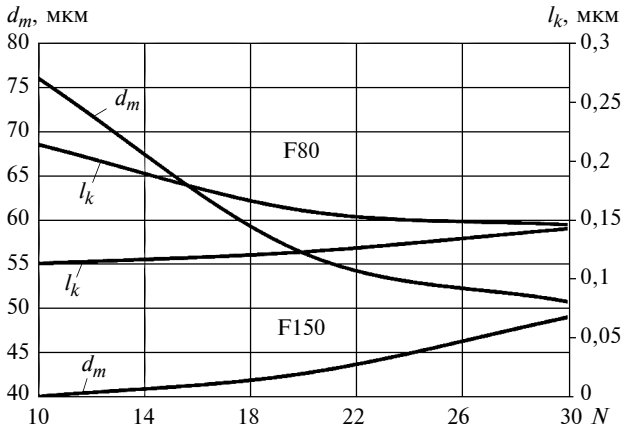


Рис. 3. Зависимости структурности N круга от среднего расстояния l_k и диаметра d_m мостика связи между зернами с размерами F80 и F150

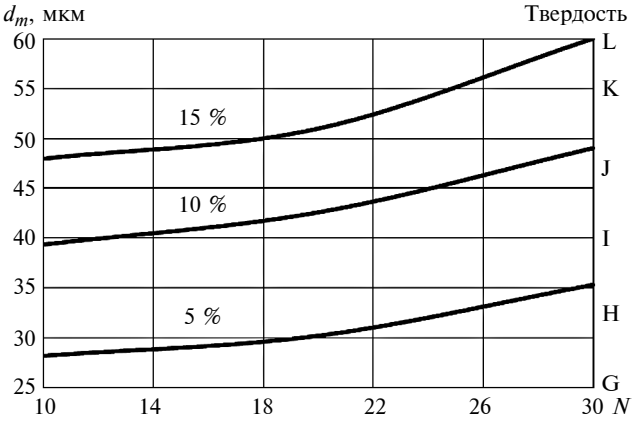


Рис. 4. Зависимости структурности круга N от его твердости, диаметра d_m мостика связи между зернами и объемного содержания керамической связки

состава инструмента актуальной становится задача управления его твердостью. На рис. 4 показано, что достижение прогнозируемой твердости от G до L обеспечивается увеличением количества связки до расчетного значения диаметра мостика связи между твердыми частицами.

Предложенная модель, основанная на статистическом обобщении пространственных характеристик компонент состава высокоструктурных шлифовальных кругов в 1 мм^3, как показал опыт ее практического применения, позволяет оптимизировать многокомпонентный состав и управлять формированием его твердости.

В известных зарубежных исследованиях принят другой подход. При моделировании объемного строения абразивного инструмента выбирается, как правило, элемент минимально возможного объема, сохраняющий все его свойства, включая равномерное распределение абразивных зерен. В зарубежных работах его называют "элементом объемной структуры" (VSE), в качестве которого рассматриваются пять правильных многогранников, так называемых "платоновых тел". Наиболее предпочтительным для моделирования мостика связи является элемент с объемной структурой тетраэдра [7—9].

По определению правильный тетраэдр — это трехгранная пирамида, расстояния между четырьмя вершинами которой соответствуют средним расстояниям между зернами в абразивном инструменте. С использованием специальных моделей и процедур моделируются керамические мостики связи между соседними зернами с переменными расстояниями, что имитирует изменение структурности шлифовального круга. Моделировали инструмент из кубического нитрида бора (КНБ) без учета наполнителя из другого абразива, зерна которого существенно больше зерен КНБ.

Идея использования тетраэдра в качестве микромодели объемного строения проверена в данной работе на высокоструктурных кругах из электрокорунда белого. Расчетом установлено, что при повышении структурности круга от № 10 до № 30 при зернистости абразива F80 объем тетраэдра увеличивается с $1{,}76 \cdot 10^{-3}$ до $4 \cdot 10^{-4}$ мм^3, а при зернистости F150 — с $1{,}81 \cdot 10^{-4}$ до $3{,}74 \cdot 10^{-3}$ мм^3. Во всех случаях этого объема оказалось недостаточно, чтобы разместить между зернами такое количество твердых частиц наполнителя и керамической связки (а также порообразователя, клеящих и увлажняющих добавок), которое необходимо для формирования оптимального состава круга на заданную структуру и твердость.

В связи с этим применение предложенной микромодели объемом 1 мм^3 в качестве VSE является более практичным для расчетов и перспективным вариантом для исследования и разработки многокомпонентных составов высокоструктурного инструмента.

Многолетняя практика применения данной методики подтверждает ее эффективность при разработке составов шлифовальных кругов со структурами № 10—20 для их серийного производства.

Условия изготовления высокоструктурного инструмента. Принципиальная особенность и преимущество высокоструктурных кругов — вариативность состава относительно заданной их характеристики, которая регламентируется набором параметров: материал и зернистость абразива, твердость, номер структуры, тип связки и предельная рабочая скорость (см. ГОСТ Р 52781—2007).

При этом отметим, что, несмотря на очевидную значимость, структурность абразивного инструмента официально не признана. До настоящего времени нет стандарта на ее определение, объемное содержание зерна в составе инструмента, методы и средства контроля. Структурность сохраняет статус параметра характеристики шлифовального круга, свободной от контроля справочной величины, но широко и негласно используется в абразивном производстве согласно рекомендациям американской фирмы Norton столетней давности [5].

При изготовлении инструмента с нормальной структурой его характеристика обеспечивается, как правило, одним вариантом состава (зерно + связка). Для высокоструктурного инструмента возможны разработка и сопоставление нескольких составов и выбор из них оптимального для реализации заданной характеристики с дополнительными опциями по улучшению технологичности и снижению себестоимости изготовления, а также повышению его режущей способности.

Одним из факторов повышения эффективности шлифования стало, например, применение высокопористых кругов. При их относительно небольшой объемной пористости 48÷52 % и структурах № 10—12 удалось обеспечить высокопроизводительную бесприжоговую обработку на многих критических операциях профильного шлифования [10].

Искусственная пористость высокоструктурного шлифовального круга, дополняющая естественную пористость, не является параметром характеристики, но используется на практике. Введением частиц порообразующего наполнителя можно управлять размерами пор и суммарной объемной пористостью инструмента. Некоторые зарубежные фирмы включают в маркировочную характеристику такую информацию, как опцию, повышающую эффективность применения инструмента.

Например, известно, что изготовить электрокорундовый инструмент на керамической связке зернистостью F80—F100 и твердостью G—H со структурой № 10—12 на рабочую скорость 35÷50 м/с весьма проблематично. Такими кругами, например, обрабатывают детали из жаропрочных никелевых сплавов на скорости 22÷25 м/с методом профильного глубинного шлифования на специализированном оборудовании, которое может работать и на более высоких скоростях.

Объясняется это неблагоприятным сочетанием низкой твердости инструмента с отсутствием резерва по свободному объему состава, достаточного для разработки его оптимального варианта. При повышении структурности до № 18—20 стало возможным изготовление и применение кругов типоразмера 1 $500 \times 80 \times 203$ зернистостью F90 и твердостью F—G для бесприжогового шлифования закаленной стали на скорости 98 м/с без принудительного охлаждения [1].

Эксплуатационные свойства высокоструктурного инструмента определяются не только рецептурным составом. Состав представляет собой сложную полиморфную композицию из 8÷12 компонентов разной плотности и дискретности, а также различной консистенции (твердой и жидкой). Поэтому формовочную массу нужно готовить по специальному регламенту с соблюдением последовательности загрузки компонентов в смесительную емкость и времени их перемешивания после каждой загрузки.

Экспериментально установлено, что в зависимости от выбранного регламента подготовки массы одного и того же состава высокоструктурного инструмента прочность на изгиб отформованной заготовки может изменяться до 2,8 раза, а разрывная прочность круга после обжига — до 2 раз. Эти результаты подтверждают большое значение условий подготовки состава в вариативности экономичного изготовления высокоструктурных шлифовальных кругов с повышенной работоспособностью.

На основании результатов исследования, а также опыта ООО "Волгашлиф Плюс" серийного производства высокоструктурных шлифовальных кругов, включая тестовые со структурами № 20—30, сформулированы базовые условия создания и изготовления инструмента с повышенными структурностью и пористостью.

1. Разработка и изготовление высокоструктурного инструмента на керамических связках должны быть ориентированы на адресное применение по техническим условиям конкретной операции шлифования. Это обеспечит его максимальную эффективность, обусловленную оптимальной характеристикой и дополнительными опциями (пористости, кромкостойкости и др.).

2. При формировании состава массы круга суммарное содержание в ней твердых компонентов (практически все, за исключением клеящих и увлажняющих добавок) не должно превышать 65÷72 % объема заготовки, что необходимо для уплотнения массы при ее формовании в заданный размер. В указанном объеме должно быть не менее 46÷60 % абразива и наполнителя в качестве компенсатора для создания объемного прочного каркаса инструмента.

3. При увеличении структурности шлифовальных кругов до № 30 возможно создание дополнительной пористости. Например, для создания "скрытой" объемной пористости применение полых микросфер различного состава и размеров может существенно уменьшить плотность круга и пропорционально повысить рабочую скорость. На рабочей поверхности инструмента тонкостенные микросферы при раскалывании образуют поверхностные поры с острыми режущими кромками, повышая также охлаждающий эффект вращающегося круга. Возможно размещение в них избыточной стружки для предотвращения "засаливания" режущего рельефа.

Наполнитель в виде молотых фруктовых косточек, выгорающий при обжиге инструмента, образует "сквозную" пористость в виде систем каналов, которая обеспечивает активное охлаждение круга и зоны обработки. Установлено [1], что до 40 % невыгоревших при обжиге косточек в смеси с керамической связкой переходят в связку и разупрочняют ее. Поэтому целесообразно включение в состав круга порообразователей в виде молотых косточек не более 10 % его объема при сопутствующей подстраховке для сохранения твердости дополнительным введением 1,0÷1,5 % связки.

4. Инструмент с повышенной структурностью с номерами более № 16—18 наиболее эффективен при скоростях шлифования 50÷100 м/с. Прочность высокоструктурного шлифовального круга как композиционного дисперсно-упрочненного инструмента обусловлена объемным содержанием в нем твердых частиц наполнителя, включая абразивные зерна, их равномерным распределением, дисперсностью и расстояниями между ними.

Эффективность применения высокоструктурного инструмента и перспективы промышленного использования его со структурами № 20—30 рассмотрены в работах [1, 3, 6]. Оригинальность новых составов подтверждена Патентами РФ.

Заключение

Предложена методика формирования композиционных дисперсно-упрочняемых абразивно-керамических составов шлифовальных кругов со структурами от № 10 до теоретически возможного № 30 и условия их изготовления. Фактически "закрыта" линейка абразивного инструмента на керамических связках по структурности — единственному параметру его характеристики, который до настоящего времени до конца не исследован и не используется на производстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Старков В. К.** Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.

2. **Ермолаев В. К.** Российские производители шлифовальных станков и абразивного инструмента // РИТМ машиностроения. 2023. № 7. С. 44—51.

3. **Вараткова Ж. В.** Импортозамещение шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. 2023. № 7. С. 585—589.

4. **Старков В. К.** Механизм влияния структурности круга на эффективность шлифования // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2019. № 1. С. 38—43.

5. **Старков В. К.** Высокопористый или высокоструктурный инструмент — выбор для высокопроизводительного бездефектного шлифования // Вестник машиностроения. 2023. № 12. С. 1039—1045.

6. **Старков В. К., Вараткова Ж. В., Ермолаев В. К.** Перспективы изготовления и применения кругов с минимальным содержанием абразива // Вестник машиностроения. 2025. № 2. С. 159—164.

7. **Kumar J. R., Ramachandra R. K.** Modeling of ceramic bonded grinding wheel structures // International Journal of Scientific Research in Science and Technology. 2017. Vol. 3. Issue 7. P. 596—605.

8. **Dittrich M.-A., Denkena B., Wichmann M.** Parametric grinding wheel model for material removal simulation 0f tool grinding processes // Procedia CIRP 102. 2021. P. 381—386.

9. **Mathematical** modeling of ceramic bond bridges in grinding wheels / M. Rom, K.-H. Brakhage, S. Barth et al. // International Association for Mathematics and Computers in Simulation. Article in Press. 2017. P. 1—17.

10. **Попов С. А., Ананьян Р. В.** Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 1980. 79 с.

Статья поступила в редакцию 05.12.2024;
одобрена после рецензирования 15.02.2025;
принята к публикации 22.02.2025.