

Научная статья

УДК 621.923

DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-2-159-164

## Перспективы изготовления и применения шлифовальных кругов с минимальным содержанием абразива

Виктор Константинович Старков<sup>1</sup>, д-р техн. наук, Жанна Владимировна Вараткова<sup>2</sup>,  
Вадим Константинович Ермолаев<sup>3</sup>, канд. техн. наук.

<sup>1, 3</sup> Москва, Россия, starkov.viktor@list.ru<sup>1</sup>, vad1605@yandex.ru<sup>3</sup>

<sup>2</sup> ООО "Волгашлиф Плюс", Рыбинск, Россия, volgashlif@mail.ru

**Аннотация.** Исследуется возможность изготовления и применение шлифовальных кругов с минимальным содержанием абразивного материала до 2 % объема при максимальной структуре № 30.

**Ключевые слова:** шлифовальный круг, технологичность, структура, абразивный материал, зернистость, твердость.

**Для цитирования:** Старков В. К., Вараткова Ж. В., Ермолаев В. К. Перспективы изготовления и применения шлифовальных кругов с минимальным содержанием абразива // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104. № 2. С. 159—164. DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-2-159-164.

Original article

## Prospects of production and application of grinding wheels with a minimum abrasive content

Viktor K. Starkov<sup>1</sup>, Zhanna V. Varatkova<sup>2</sup>, Vadim K. Ermolaev<sup>3</sup>

<sup>1, 3</sup> Moscow State Technological University Stankin, Moscow, Russia, starkov.viktor@list.ru<sup>1</sup>, vad1605@yandex.ru<sup>3</sup>

<sup>2</sup> ООО "Vlgashlif Plus", Rybinsk, Russia, volgashlif@mail.ru

**Abstract.** The possibility of manufacturing and using grinding wheels with a minimum content of abrasive material up to 2 % by volume with a maximum structure of N. 30 is studied.

**Keywords:** grinding wheel, manufacturability, structure, abrasive material, graininess, hardness.

Работоспособность шлифовального круга с заданной характеристикой определяется, как известно, оптимальным сочетанием абразивной массы с другими компонентами. Базовыми компонентами являются абразивное зерно и связка, от свойств и количества которых зависит работоспособность инструмента.

Количество абразива регулируется структурированной системой его содержания в объеме массы — от 62 % для структуры 0 до 2 % для структуры № 30, с увеличением в 2 %. Количество связки (чаще керамической) определяется необходимой прочностью соединения абразивных зерен между собой или твердостью круга — чем больше связки в массе, тем тверже инструмент. Для абразива отмечена противоположная закономерность — с уменьшением содержания зерна в круге повышается его работоспособность. Заметный прогресс в совершенствовании процессов шлифования за последние годы достигнут в результате повышения структурности инструмента с № 6—9 до № 16—18 при уменьшении в его составе абразивного зерна до 2 раз [1, 2].

Позитивный эффект повышения структурности обусловлен возможностью одновременного увеличения твердости круга и соответственно стойкости и уменьшения зернистости абразива для более качественной обработки деталей без риска появления на них прижогов и трещин. Именно повышение структурности отечественного инструмента стало решающим фактором успешного замещения лучших зарубежных аналогов [3, 4].

По структурности отечественные шлифовальные круги соответствуют кругам ведущих зарубежных фирм. Например, американская корпорация 3M, в состав которой входят европейские фирмы Winterthur, Slip Naxos, Wendt и др., поставляет на рынок инструмент со структурой до № 19 [5]. Фирма Norton, предложившая структурировать инструмент по объемному содержанию абразива еще в 1920 г., в рекламных материалах прогнозирует возможность изготовления шлифовальных кругов со структурой только до № 28 [6].

Перспективность применения нового абразивного инструмента предопределяется, прежде все-

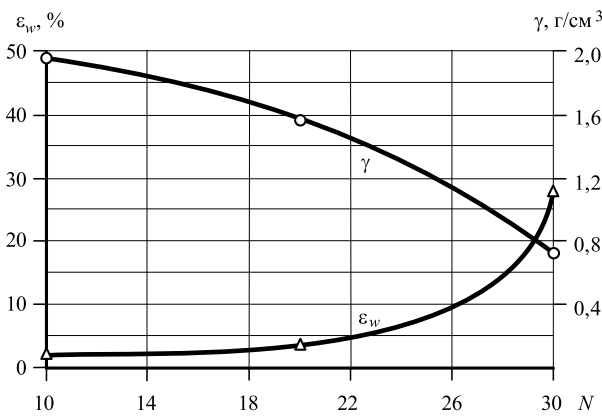


Рис. 1. Влияние структурности  $N$  шлифовального круга на его объемную деформацию  $\epsilon_w$  при обжиге и плотность  $\gamma$

го, возможностью и технологичностью его изготовления.

Технологичность — это комплексная оценка соответствия формовочной массы круга и регламента ее приготовления требованиям стабильности выполнения заданной характеристики (особенно твердости), устойчивости заготовки инструмента к объемной деформации (усадке) при высокотемпературном обжиге, затрат на последующее формообразование механической обработкой и др. Решающими факторами для принятия решения о целесообразности серийного производства являются качество, экономичность и экологичность изготовления инструмента.

В ООО "Волгашлиф Плюс" освоена технология серийного производства высокоструктурных кругов со структурами № 10—19, эффективность которых подтверждается множеством операций маятникового и глубинного шлифования, в том числе при импортозамещении [3]. Дальнейшим развитием накопленного опыта стало создание шлифовальных кругов с минимальным содержанием в формовочных массах абразивного зерна от 18 до 2 % объема (структуры № 20—30). Экспериментально технологичность изготовления оценивали на шлифовальных кругах типоразмера 1 200 × 30 × 32 в сравнении с инструментом со структурой № 10 (42 об. % зерна) и № 20 (22 %). Оценку проводили по средним значениям трех измерений изготовленных кругов одного состава.

На рис. 1 показано изменение ключевых параметров технологичности — объемной деформации  $\epsilon_w$  кругов после обжига и их плотности  $\gamma$  при увеличении структурности  $N$  от № 10 до № 30. В исследованном диапазоне структур сохраняется тенденция увеличения объемной усадки с 2,2 % для круга № 10 до 27,6 % для круга № 30. Выявленная закономерность обусловлена принципиальным изменением состава формовочных масс инструмента

с минимальным содержанием абразива. Оптимальным содержанием абразива в шлифовальном круге на керамических связках принято считать 44:52 % его объема (структуры № 5—9).

При приготовлении формовочной массы и последующем ее прессовании формируется объемный каркас круга из плотноупакованных "в стык" абразивных зерен, которые при обжиге прочно скрепляются мостиками связки. В этом случае отсутствует возможность перемещения тяжелых зерен, например, электрокорунда с плотностью 3,95 г/см<sup>3</sup> под собственной тяжестью в расплавленной связке при высокотемпературном обжиге круга и соответственно уменьшения его объема при "стягивании" зерен затвердевающей связкой. С дальнейшим повышением структурности инструмента и сопутствующим уменьшением количества абразива для его изготовления становится обязательным введение в массу наполнителей-компенсаторов для сохранения плотности упаковки в ней твердых компонентов и обеспечения ее устойчивости к объемной деформации при обжиге [2]. При этом, как было отмечено, повышается эффективность применения шлифовальных кругов, но снижается технологичность и, как следствие, экономичность их изготовления.

Практика производства высокоструктурного инструмента показала, что введение разных наполнителей взамен абразивных зерен не всегда позволяет сохранить его минимальную объемную деформацию при обжиге. Поэтому важен подбор оптимальной композиции из разных выгорающих и невыгорающих наполнителей. Необходимо, чтобы объемная деформация круга не превышала величины  $\epsilon_w^*$ , при которой фактическое содержание  $V_3^*$  абразива после обжига сохранялось в пределах допуска  $\pm 1$  % от исходного его значения  $V_3$ :

$$V_3^* = V_3 / (1 - \epsilon_w).$$

В данной работе интерес к изготовлению образцов высокоструктурного инструмента связан, безусловно, с оценкой технологичности его вариантов с минимальным содержанием абразивных зерен, когда их участие в формировании объемного каркаса круга практически нивелировано. В связи с этим отметим, что особенностью изготовления круга, например, со структурой № 30 (см. рис. 1), стала относительно большая объемная усадка при обжиге, которая, однако, для содержания 2 % абразива (см. формулу (1)) находится в допустимых пределах 33,3 %. Другая особенность — заметное уменьшение после модификации состава плотности круга до 2,7 раза в сравнении с плотностью инструмента со структурой № 10.

Известно, что при снижении веса круга пропорционально уменьшается центробежная сила, дейс-

твующая на него при шлифовании, а следовательно, появляется возможность повышения его рабочей скорости.

При обжиге более легкого инструмента практически не проявляется так называемый "эффект конусности", когда после осадки массы крупногабаритного высокоструктурного круга его цилиндрическая конфигурация трансформируется в усеченный конус. Например, после осадки обожженного круга  $\varnothing 500$  мм, высотой до 200 мм и структурой № 14—16 разность диаметров его двух торцевых поверхностей может достигать 100 мм. При изготовлении кругов со структурами № 10—30 увеличение диаметра торца, расположенного на поддоне, при объемной осадке составило  $0,15 \pm 0,3$  %.

С увеличением структурности инструмента увеличиваются потери массы при обжиге. При температуре обжига  $1250$  °С в формовочной массе частично или полностью выгорают и испаряются наполнители-порообразователи, клеящие и увлажняющие добавки и керамическая связка. Потеря массы круга со структурой № 30 возрастает в 18,5 раза по сравнению со структурой № 10, если учитывать расчетную базу по весу кругов соответственно 0,76 и 1,94 кг. Отметим, что все продукты выгорания и испарения массы высокоструктурных кругов экологически безопасны, так как являются продуктами растительного происхождения.

Технологической проблемой является изготовление мелкозернистых среднетвердых (твердость  $O$ ,  $P$ ,  $Q$ ) и твердых (твердость  $R$ ,  $S$ ) шлифовальных кругов на керамических связках. Ввиду необходимости введения в их составы большого количества связки практически полностью устраняется объемная пористость, что повышает риск появления шлифовочных дефектов (прижогов, микротрещин) на обработанной поверхности детали. С повышением структурности до № 30 проблема успешно решается образованием дополнительного пространства в объеме круга для введения большого количества керамической связки.

Оценивая полученные результаты в целом, отметим, что технологичность изготовления шлифовальных кругов с минимальным содержанием абразива соответствует возможности их качественного, экономичного и экологичного серийного производства. Отмеченная особенность повышенной объемной деформации при обжиге компенсируется навеской массы на формование заготовки, при этом ее себестоимость существенно меньше себестоимости абразивных масс высокоструктурного инструмента, применяемого в настоящее время. С учетом приобретенного опыта разработаны новые составы формовочных масс с повышенной устойчивостью к объемной деформации, позволяющие снизить ее в 3—4 раза.

Результаты проведенной работы позволили продолжить и завершить линейку шлифовальных кругов со структурой от № 20 до последнего № 30 в соответствии с международной классификацией. Подчеркнем также, что данная статья — результат пионерской работы в отечественной практике производства шлифовальных кругов. Получены предпосылки для априорной оценки их режущей способности в сравнении с достигнутым уровнем шлифования известным высокоструктурным инструментом и перспектив возможного приращения.

Известно, что шлифование — процесс стохастический, вероятностная природа которого обусловлена большим количеством взаимосвязанных и независимых случайных явлений. Основным генератором стохастичности является шлифовальный круг с непрерывно обновляемым режущим рельефом из множества абразивных зерен. Их морфологические (размеры и острота кромок) и прочностные свойства, количество и топография распределения в объеме и на рабочей поверхности имеют случайный разброс своих значений.

При шлифовании в контактной зоне обработки за 1 с происходит до  $10^6 \div 10^7$  единичных актов стружкообразования зернами с индивидуальной режущей способностью и случайной ориентацией их режущих кромок относительно траектории резания. Вероятность одновременного оптимального сочетания указанных независимых факторов формирования режущего рельефа случайного характера в условиях шлифования практически ничтожна — менее 6 %.

В связи с этим анализ влияния входных параметров шлифования на параметры его эффективности в большей степени является концептуальным, определяющим основные связи и закономерности. Это относится и к оценке режущей способности высокоструктурного шлифовального круга в зависимости от морфологических и топографических параметров рабочей поверхности, характерных для его структурности, материала, зернистости абразива и др.

К высокоструктурному инструменту теперь можно отнести круги со структурой от № 10 и умеренной пористостью 45 % до структуры № 30 и повышенной до 85 % пористостью с учетом "закрытой" пористости разных по составу и размерам их наполнителей.

Сравнительный анализ работоспособности инструмента с минимальным содержанием абразива проводили для условий плоского шлифования по технологическим схемам маятниковой и глубокой обработки. Эффективность процесса оценивали по комфортности физических условий стружкообразования с максимумом абразивных зерен, уда-

ляющих обрабатываемый материал, при минимуме сопутствующих энергозатрат. Теоретически работоспособность шлифовального круга можно прогнозировать по его топографическим характеристикам — среднему расстоянию  $l_3$  между соседними зернами и их количеству  $Z_3$  на рабочей поверхности инструмента. Эти взаимосвязанные величины обусловлены средним размером  $A_3$  зерна и его относительным содержанием в объеме  $V_3$  круга:

$$l_3 = 1,145 \frac{A_3}{V_3^{2/3}}; \quad Z_3 = 0,763 \frac{V_3^{2/3}}{A_3^2}.$$

На рис. 2 и 3 приведены топографические характеристики инструмента в диапазоне структур № 10—30 с зерном из электрокорунда белого. Выбранная зернистость от F80 до F220 наиболее целесообразна для инструмента с минимальным содержанием абразива.

Анализ расчетных данных показал наличие аналогий для уже применяемых на практике кругов и нового инструмента с минимальным содержанием абразива. Например, на графиках представлены характеристики для электрокорундовых кругов зернистостью F80 и структурами № 14—16, которые отличаются высокой эффективностью при маятниковом и профильном глубинном шлифовании. Их аналогами в этом плане могут быть круги зернистостью F120 со структурами № 23—26, F150 — со структурами № 28—29, F220 — со структурой № 30 (штриховая линия на графиках — граница подобия).

Структурность шлифовального круга взаимосвязана с его зернистостью и режимом обработки и влияет на комфортность шлифования. Физичес-

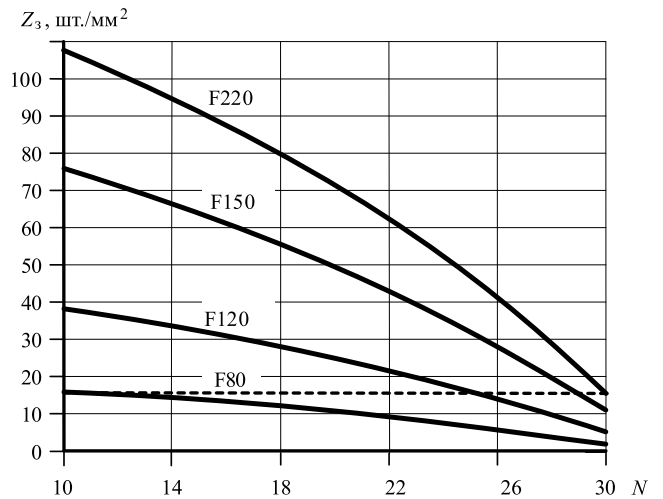


Рис. 3. Влияние структурности  $N$  шлифовального круга на количество абразивных  $Z_3$  зерен разной зернистости на его рабочей поверхности

кая сущность понятия "комфортность шлифования" заключается в эффективности механизма микрорезания (царапания) материала обрабатываемой поверхности детали острой кромкой абразивного зерна. Зерно на рабочей поверхности круга, перемещаясь по заданной траектории, после касания обрабатываемой поверхности предварительно деформирует материал до критического состояния, необходимого для образования трещины разрушения и последующего отделения стружки.

Предварительная упругопластическая деформация с нарастающим давлением режущей кромки на обрабатываемый материал сопровождается трением скольжения. Оба процесса совокупно инициируют интенсивный нагрев контактной зоны резания. Одновременная работа большого числа абразивных зерен в закрытой зоне шлифования создает негативный термодинамический эффект совместного действия на качество и экономичность обработки (рис. 4). Феноменологически начало процесса стружкообразования при царапании режущей кромкой абразивного зерна с радиусом  $\rho$  ее округления совпадает с моментом достижения "порога резания", т. е. ожидаемой толщины  $a_0$  стружки от внедрения зерна в обрабатываемый материал в соответствии с условием

$$a_0 \geq k_p \rho. \tag{1}$$

Коэффициент  $k_p$ , который условно можно назвать "коэффициентом комфортности шлифования", по разным источникам изменяется от 0,025 до 1,08 в зависимости от пластичности металла, радиуса округления царапающей кромки, ее формы и угла заострения, скорости перемещения и т. д. (см. работу [2]). В данной работе для расчетов приняли

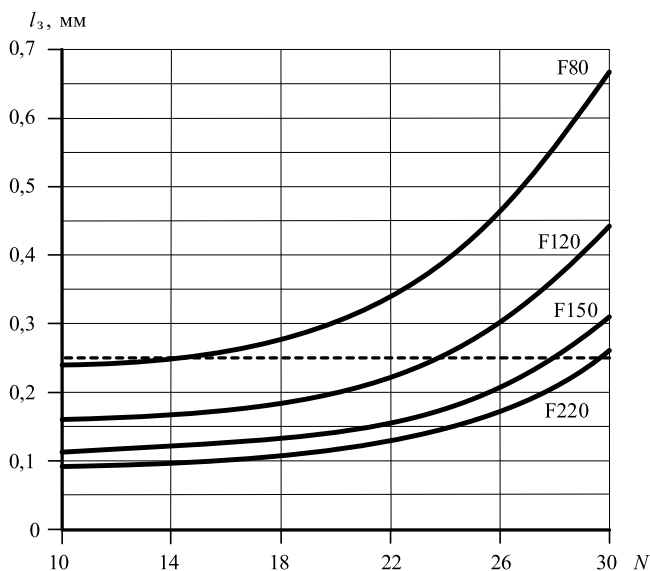


Рис. 2. Влияние структурности  $N$  шлифовального круга и зернистости абразивных зерен на расстояние  $l_3$  между ними

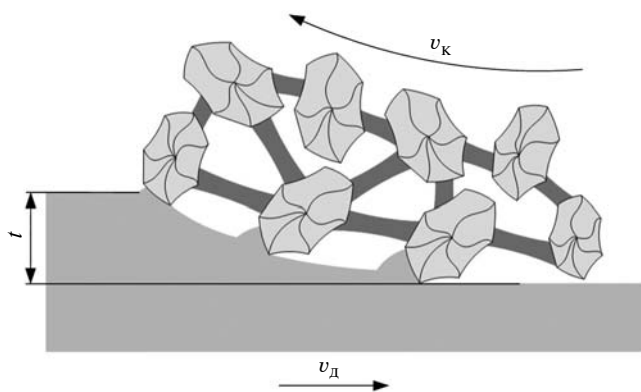


Рис. 4. Схема микрорезания при шлифовании

коэффициент  $k_p = 0,1$ , соответствующий шлифованию абразивными зёрнами разной зернистости. В таблице приведены принятые расчетные характеристики зёрен электрокорунда белого по их размерам и радиусам округлений режущих кромок.

Для сравнения физических условий шлифования выбрали применяемые на практике варианты режимов маятниковой и глубинной обработки, которые репрезентативно отражают их различие по механизму формирования стружки. Режим маятникового шлифования: скорость круга  $V_k = 35$  м/с, скорость перемещения детали  $V_d = 20$  м/мин, глубина прохода  $t = 0,1$  мм; режим глубинного шлифования:  $V_k = 25$  м/с,  $V_d = 1$  м/мин,  $t = 2$  мм. Диаметр круга принят одинаковым — 500 мм.

Существенное различие этих двух схем обработки заключается в отношении  $q = V_k/V_d$  скоростей вращения круга и продольного перемещения обрабатываемой детали. При маятниковой схеме обработки с  $q = 105$  и длине контакта  $L_k = 7,07$  мм образуется толстая и короткая стружка, а при глубинной схеме с  $q = 1500$  и  $L_k = 31,6$  мм — тонкая и длинная стружка.

Влияние структурности абразивного инструмента на эффективность его применения можно объяснить следующим образом. Когда в контакт с обрабатываемым материалом вступает новое зерно, после прохода предыдущего зерна остается несрезанным материал толщиной  $l_3/q$ . После этого возможны два следующих варианта: толщина  $l_3/q$  по условию (1) достаточна для начала стружкообразования или зерно должно продолжить внедрение в обрабатываемый материал до момента ее достижения (см. рис. 4).

До начала формирования стружки по второму варианту режущему зерну необходимо дополнительное время на углубление в срезаемый слой и его удаление. Это время пропорционально расстоянию  $l_3$  между режущими зёрнами и отношению  $q$  скоростей. Расчетная оценка по предложенной методике в конечном итоге трансформировалась в

относительное содержание количества абразивных зёрен на рабочей поверхности инструмента, которые не выполняют полезную работу резания, а только деформируют и упрочняют обработанную поверхность детали с сопутствующим интенсивным нагревом.

Теоретически установлено, что в исследованных технологических условиях маятникового шлифования практически все зёрна рабочей поверхности круга в зоне контакта с деталью выполняют полезную работу резания. В условиях глубинного шлифования с увеличением структуры круга от № 10 до № 30 расчетное количество активно работающих зёрен в зависимости от их зернистости увеличивается с 94,6 до 98,9 %.

Отметим, что, например, на линии контакта шлифовального круга с деталью зёрна, предположительно, располагаются друг за другом на средневероятном расстоянии  $l_3$  (см. рис. 2), и при маятниковой обработке их количество составляет 11—62 в зависимости от зернистости и структурности инструмента и аналогично при глубинной — от 47 до 277, что почти в 4,5 раза больше. Поэтому при глубинном шлифовании целесообразно уменьшать зернистость инструмента и повышать его структурность.

При использовании высокоструктурных кругов, особенно при минимальном содержании абразива, весьма эффективно повышение скорости шлифования [7]. При ее увеличении пропорционально возрастает скорость пластической деформации обрабатываемого металла с локализацией упрочняемой зоны перед движущейся режущей кромкой зерна. С позиций дислокационной физики разрушения происходит быстрый переход субструктуры упрочненного металла в критическое состояние бифуркации с повышенной плотностью дефектов кристаллического строения и хаотичным их распределением, которое предшествует разрыву межатомных связей с образованием трещины. Стружкообразование в этих условиях начинается при меньших глубинах и времени внедрения абразива в обрабатываемый материал [8].

Экспериментальные исследования при шлифовании абразивными зёрнами и царапании острым индентором в склерометрии подтверждают отме-

Размеры абразивных зёрен и радиусы округлений их кромок

Зернистость абразива	Средний размер зерна, мм	Радиус округления кромок, мм
F80	0,16	0,013
F120	0,106	0,07
F150	0,075	0,05
F220	0,063	0,04

ченный физический эффект [2]. Например, в работе [9] показано, что при увеличении скорости шлифования с 20 до 60 м/с коэффициент  $k_p$  в выражении (1) уменьшается с 0,24 до 0,025 или почти в 10 раз. При таком существенном уменьшении коэффициента комфортности шлифования можно ожидать увеличения числа новых зерен для съема материала в зоне обработки. В предложенной в данной работе расчетной модели шлифования для электрокорундового абразива зернистостью F80 принят средний радиус округления его кромок 0,013 мм (см. таблицу). При этом снимать стружку по условию (1) будет только часть абразивных зерен с радиусом  $\rho > 0,013$  мм от их количества на рабочей поверхности круга. Измерениями Д. Б. Ваксера [10] установлено, что для зерен этой характеристики радиус округления кромок находится в диапазоне 0,0028÷0,056 мм со средневероятным значением 0,013 мм. Соответственно можно ожидать, что при повышенной скорости круга все зерна на рабочей поверхности будут выполнять полезную работу съема материала, так как для выполнения условия (1) необходимо уменьшение коэффициента  $k_p$  для зерна F80 только в 4,6 раза. Теоретический прогноз показывает, что инструмент с минимальным содержанием абразива обеспечивает максимально возможную комфортность их применения при маятниковом и глубинном шлифовании с точки зрения физических условий стружкообразования. К этому следует добавить и кинематическую составляющую процесса шлифования, когда при повышении скорости круга пропорционально увеличивается количество режущих зерен в зоне обработки и одновременно уменьшается толщина срезаемой стружки.

Количество  $Z_v$  зерен, участвующих в резании в единицу времени, зависит от номера  $N$  структуры круга и его зернистости  $A_3$ , выражаемой через средний размер зерна:

$$Z_v = 0,763 \frac{(0,62 - 0,02N)^{2/3}}{A_3^2} V_k.$$

Толщина срезаемой стружки не должна превышать высоту зерен над рабочей поверхностью круга, называемую разновысотностью. Эта величина определяет основные параметры режима плоского шлифования при заданном диаметре инструмента. Разновысотность зависит от зернистости, твердости круга, условий правки и других параметров, и ее величина, в виде коэффициента  $k_a$  от среднего размера зерна, ориентировочно составляет 0,2÷0,3:

$$k_a A_3 \geq \frac{V_d}{V_k} \sqrt{Dt}. \quad (2)$$

Формула (2) позволяет подобрать оптимальную зернистость абразива для высокоструктурного инструмента, варьируя параметрами режима шлифования включительно до предельно возможной скорости круга. Можно решить обратную задачу: при заданной зернистости круга подобрать оптимальную комбинацию параметров режима обработки.

В заключение отметим, что разработанные составы и технология изготовления шлифовальных кругов с минимальным содержанием абразива до 2 % объема и максимально возможной структурой № 30, проверенные в производственных условиях ООО "Волгашлиф Плюс", подтвердили принципиальную возможность их технологического серийного производства.

Приоритетной областью практического применения инструмента со структурой от № 20 до № 30 может стать высокоскоростное бездефектное шлифование с рабочими скоростями от 63 до 120 м/с, в том числе без СОЖ. Целесообразно также с повышенной структурностью изготавливать инструмент с зернистостью F150—F220 и меньше и инструмента с повышенной твердостью до M—R и тверже. Такие круги востребованы, например, для точного резбошлифования мелко модульных резбовых соединений.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Глубинное** шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С. С. Силин, В. А. Хрульков, А. В. Лобанов, Н. С. Рыкунов. М.: Машиностроение, 1984. 64 с.
2. **Старков В. К.** Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
3. **Вараткова Ж. В.** Импортзамещение шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. 2023. № 7. С. 585—589.
4. **Старков В. К.** Высокопористый или высокоструктурный инструмент — выбор для высокопроизводительного бездефектного шлифования // Вестник машиностроения. 2023. № 12. С. 1039—1046.
5. **3M France.** Solutions Abrasives pour l'Industrie. 2016. С. 36.
6. **Catalog NORTON. SAINT-GOBAIN. PRECISION ABRASIVES.** Full-Line Industrial Market. 2017. С. 266.
7. **Ермолаев В. К.** Высокоскоростная обработка — ключ к развитию шлифования // Ритм машиностроения. 2020. № 7. С. 16—23.
8. **Старков В. К.** Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. 640 с.
9. **Филимонов Л. Н.** Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, 1979. 248 с.
10. **Ваксер Д. Б.** Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании. М.—Л.: Машиностроение, 1964. 123 с.

*Статья поступила в редакцию 26.06.2024;  
одобрена после рецензирования 20.07.2024;  
принята к публикации 24.07.2024.*