

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №3 (129). С. 18-26.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №3 (129). P. 18-26.

Научная статья
УДК 62-1/-9
doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-18-26

Сравнительный анализ механической прочности шлифовальных кругов

Владимир Григорьевич Гусев, д.т.н.
Владимирский государственный университет, г. Владимир, Россия
prof_gusev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6514-8522>

Аннотация. Рассмотрена проблема создания высокопрочного шлифовального инструмента. Показана возможность интенсификации режимов шлифования путем использования сборных текстурированных кругов. Установлено, что высокопрочные абразивные сегменты с торцевыми и осевыми выступами следует использовать соответственно для узких и широких сборных текстурированных кругов.

Ключевые слова: шлифование, текстурированный круг, абразивный сегмент, выступ, напряжения, механическая прочность

Для цитирования: Гусев В.Г. Сравнительный анализ механической прочности шлифовальных кругов // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №3 (129). – С. 18-26. doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-18-26.

Original article

Comparison study of rotary grindstone mechanical strength

Vladimir G. Gusev, Dr. Sc. Tech.
Vladimir State University, Vladimir, Russia
prof_gusev@mail.ru

Annotation. The problem of high-strength grinding tool creation is described. The possibility of intensifying grinding modes by using prefabricated textured wheels is shown. It is found that high-strength abrasive segments with edge and axial projections should be used, respectively, for narrow and wide prefabricated textured wheels.

Keywords: grinding, textured wheel, abrasive segment, projection, stresses, mechanical strength

For citation: Gusev V.G. Comparison study of rotary grindstone mechanical strength. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.3 (129), pp. 18-26. doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-18-26.

Введение

Среди известных направлений совершенствования конструкций кругов и процессов шлифования (дискретизация режущей поверхности, разработка устройств для подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и др.) сравнительно быстро развивается направление, связанное с исследованием текстурированных кругов и процессов шлифования на их основе, что обусловлено сравнительно малыми временными, материальными и трудовыми затратами на их реализацию и повышением производительности процессов обработки.

На сегодняшний день разработаны и проведены научные исследования шлифовальных кругов с дискретной режущей поверх-

ностью, выполненной лазерным излучением и абразивно-жидкостной струей высокого давления [1 – 3]. Исследованы износ алмазного инструмента при правке дискретных шлифовальных кругов [4], формообразование, температура и шероховатость поверхности при комбинированном плоском периферийном шлифовании [5, 6]. Получены положительные результаты по уменьшению износа алмазного инструмента, температуры шлифуемой заготовки и геометрических погрешностей шлифованных поверхностей, что положительно сказывается на снижении расхода правящего инструмента и повышении точности изделий.

За рубежом (в Китае, Великобритании США, Японии и др. странах) созданы тексту-

рированные шлифовальные круги (TGWs – textured grinding wheels), которые имеют на рабочей поверхности активные и пассивные участки [7]. Текстура – это пассивные участки, которые не имеют абразивных зерен, её размеры могут варьироваться в значительных пределах в зависимости от размеров шлифовальных кругов и степени снижения температуры в зоне резания.

Текстурированная рабочая поверхность позволяет уменьшить время контакта круга с заготовкой, силу резания и температуру обрабатываемой заготовки. Дополнительная функция текстуры состоит в обеспечении транспортировки хладагента в достаточных объемах в зону резания, в увеличении объема элементарной стружки, удаляемой единичным абразивным зерном, а также в избавлении зоны резания от обломков абразивных зерен и облегчении отвода стружки [7].

Потребность в текстурированных инструментах в 2015 году достигла по рыночной стоимости около \$ 6 млрд, а в течение периода времени с 1990 по 2016 годы по этому направлению зарегистрировано более 15 000 патентов и опубликованных научных работ [8]. Приведенные данные свидетельствуют о том, что научные исследования и разработки, связанные с текстурированными шлифовальными кругами (TGWs), имеют большое значение как для академической науки, так и промышленности [8].

Текстурированные сборные круги позволяют реализовать центробежный способ подачи СОЖ, разгонять её до скорости резания, обогащать кислородом воздуха, снижать коэффициент трения и интенсифицировать отвод тепла из зоны резания путем создания мощных аэро- и гидродинамических потоков быстро вращающимися сегментами (лопастями). Интенсивный отвод тепла приводит к снижению импульсной температуры до 3-х раз [1].

Повышение производительности процессов шлифования путем реализации интенсивных режимов резания вызывает значительное увеличение внешней рабочей нагрузки на инструмент, который должен обладать достаточно высокой механической прочностью, однако этому вопросу не уделялось должного внимания.

Целью настоящего исследования является создание высокопрочных конструкций шлифовальных кругов, обеспечивающих интенсификацию процессов обработки.

Материалы и методы

С использованием научных положений общетехнических и профессиональных дисциплин выполнен анализ напряжений в опасных несущих сечениях различных шлифовальных кругов, что позволило оценить механическую прочность инструментов. Для проверки результатов анализа были изготовлены реальные образцы кругов и проведены их испытания на механическую прочность путем вращения на испытательном стенде в соответствии с ГОСТ Р 52588-2011 «Инструмент абразивный. Требования безопасности».

Текстурированные круги, оснащенные абразивными сегментами с торцевыми и осевыми выступами, а также с радиальными отверстиями, вырезанными высококонцентрированными потоками энергии, были также испытаны в процессе шлифования отверстий колец подшипников. Результаты испытаний сравнивали с процессом шлифования стандартным кругом.

Обрабатывали кольца подшипников 7214, 3622, материал ШХ-15, ШХ-15СГ, 61...63 HRC_э на внутришлифовальных станках 3А227В и СВАЙГЛ-250, характеристика абразивного материала сегментов – 25АF60KV5 и 25АF90LV5. Режим резания: скорость резания – 50 м/с; частота двойных ходов в минуту $n_{2,x} = 60$; поперечная подача $S_{п} = 2$ мм/мин. Режим резания при шлифовании стандартным кругом отличался значением поперечной подачи, которая составляла $S_{п} = 0,4$ мм/мин. Сравнили среднее арифметическое отклонение профиля поверхностей, шлифованных стандартным и текстурированными кругами.

Результаты

Сравнительный анализ механической прочности различных шлифовальных кругов возможен на основе аналитических моделей напряжений, возникающих в несущих сечениях кругов в процессе испытания их на стенде методом вращения. Механическая прочность стандартных шлифовальных кругов определяется наиболее опасными для абразивного материала окружными (растягивающими) напряжениями, возникающими у посадочного отверстия круга. Значения этих напряжений определяются по формуле:

$$\sigma_{окр} = 0,25 \gamma v^2 (3 + \mu + (1 - \mu) m^2), \quad (1)$$

где γ , v – соответственно плотность абразивного материала и окружная скорость шлифовального круга; $\mu = 0,25$ – коэффициент Пуассона для абразива на керамической связке; m – отношение радиуса r посадочного отверстия к радиусу R режущей поверхности круга.

Радиальные напряжения на внутренней и наружной цилиндрических поверхностях стандартного круга равны нулю. В сборных текстурированных шлифовальных кругах ликвидирована область посадочного отверстия, выполненная из абразивного материала в стандартных и других шлифовальных кругах. В сборном текстурированном круге посадоч-

ное отверстие выполнено в металлическом корпусе, что значительно повышает его прочность по сравнению со стандартным кругом.

Абразивные сегменты в сборном текстурированном круге закреплены по торцевым или осевым выступам. Прочность сегментов с торцевыми выступами 1 и 2 (рис. 1) определяется напряжениями растяжения в сечении $k-k$, вызванными центробежной силой Q_1 , действующей на полезно используемую часть сегмента, и напряжениями изгиба в сечении $k-n$ от действия вертикальной составляющей N' реакции N корпуса круга на сегмент.

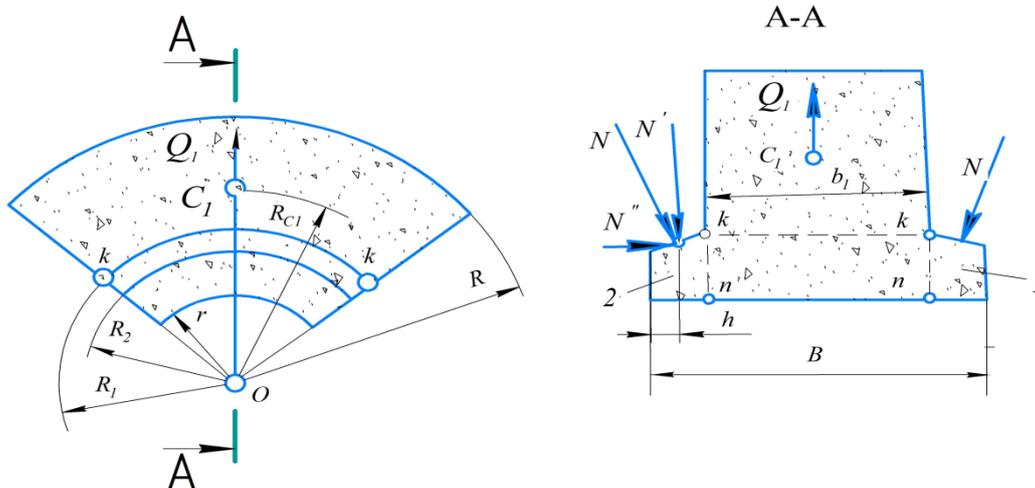


Рис. 1. Абразивный сегмент с торцевыми выступами под действием центробежной силы и сил закрепления

Напряжения растяжения от центробежной силы Q_1 определяются по формуле:

$$\sigma_p = Q_1/S_{k-k} = 0,5\gamma\omega^2 R_{c1} F_1 n / \pi R_1, \quad (2)$$

где F_1 – площадь поперечного сечения полезно используемого абразивного слоя сегмента; $R_{c1} = 0,6(6)R^3(1 - m^3)\sin(\pi/n)/F_1$ – расстояние от оси вращения круга до центра массы C_1 полезно используемого слоя сегмента; ω , n – угловая скорость и число сегментов в текстурированном круге соответственно; $m_1 = R_1/R$ – отношение радиуса дуги $k-k$ к радиусу R режущей поверхности круга.

Подставив в (2) значение R_{c1} , получим:

$$\sigma_p = (0,106n\gamma v^2 \sin(\pi/n)) / m_1. \quad (3)$$

$$W_{k-n} = 0,16(6) \cdot (\pi R^3 (m_{cp} + m)(m_1 - m)^2) / n, \quad (6)$$

где $m_{cp} = \frac{R_{cp}}{R}$, $R_{cp} = 0,5(R_1 + R_2)$, $m_1 = R_1/R$.

Напряжения изгиба в сечении $k-n$ от действия вертикальной составляющей N' реакции N корпуса круга на сегмент равны:

$$\sigma_{из} = N' * h / W_{k-n}, \quad (4)$$

где W_{k-n} – момент сопротивления сечения $k-n$ при изгибе.

Реакция N' равна $Q/2$, где Q – центробежная сила, действующая в процессе шлифования на весь сегмент. Она определяется по формуле:

$$Q = 0,6(6)b_1 R^3 k_p (1 - m^3) \gamma \omega^2 \sin(\pi/n), \quad (5)$$

где b_1 – высота режущей поверхности сегмента; $m = r/R$, $k_p = 1,07$ – коэффициент, учитывающий наличие выступов.

Плечо h силы N' равно $(B - b_1)/4$, а момент сопротивления сечения $k-n$ при изгибе определяется по формуле:

Подставив значения N' , h и W_{k-n} в (4), получим:

$$\sigma_{и} = \frac{k_p m_{b1}^2 n \gamma v^2 (1-m^3)(k_b-1) \sin(\pi/n)}{\pi(m_{cp}+m)(m_1-m)^2}, \quad (7)$$

где $m_{b1} = b_1/R$; $k_b = B/b_1$.

Из (7) следует, что напряжения изгиба при закреплении сегментов по торцевым выступам зависят от относительной высоты m_{b1} сегмента во второй степени и отношения k_b . Зависимости (3), (7) позволяют вычислить напряжения разрыва и изгиба в несущих сечениях сегмента, закрепленного за торцевые выступы, и оценить его прочность.

Прочность сегмента с осевыми выступами (рис. 2), определяется напряжениями растяжения в сечении $k-k$ от действия центробежной силы Q_1 и напряжений изгиба в сечениях $k-n$ от реакции N корпуса круга.

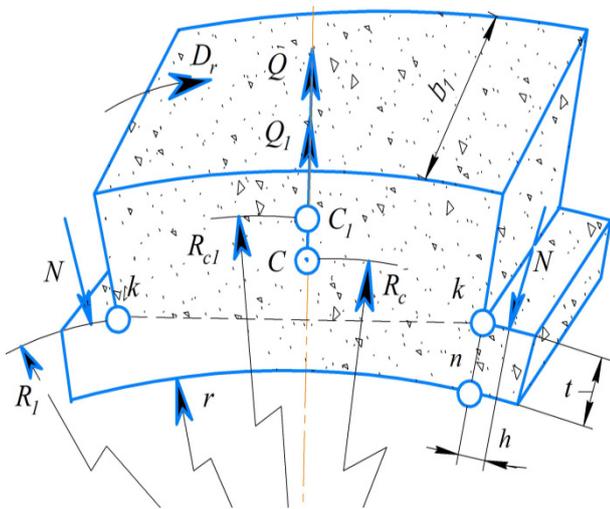


Рис. 2. Абразивный сегмент с осевыми выступами под действием центробежной силы и сил закрепления

Напряжения растяжения в сечении $k-k$ равны:

$$\sigma_p = \gamma \omega^2 R_{c1} F_1 / a_1 = \gamma v^2 R_{c1} F_1 / a_1 R^2, \quad (8)$$

где a_1 – расстояние между точками k пунктирной линии, изображенной на рис. 2.

Напряжения изгиба в точке k равны $N \cdot h / W$, где h – плечо силы N относительно сечения

$k-n$; $W = b_1 t^2 / 6$ – момент сопротивления сечения $k-n$ высотой t . Подставив $N = 0,5 Q \cos \beta$, где $Q = \gamma \omega^2 F b_1 R_c$; F – площадь поперечного сечения сегмента; R_c – расстояние от оси вращения текстурированного круга до центра массы C сегмента; $\beta = \pi/n$ – угол между силами Q и N , получим:

$$\sigma_{и} = 3 \gamma v^2 F R_c h / R^2 t^2 \cos(\pi/n). \quad (9)$$

Формулы (8), (9) позволяют вычислить напряжения в несущих сечениях при закреплении сегмента за осевые выступы и оценить их механическую прочность. Прочность круга с сегментами, приклеенными к металлическим пластинам, определяется прочностью клеевого соединения. Напряжения растяжения в сегменте в этом случае определяются по формуле (3).

Прочность цельного круга с выступами и впадинами (рис. 3) определяется напряжениями разрыва от центробежных сил в ослабленном осевом сечении $a-a$, проходящем через середину диаметрально расположенных впадин.

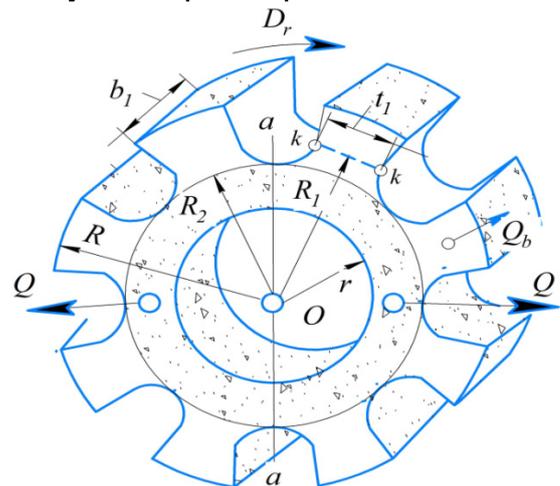


Рис. 3. Цельный шлифовальный круг с радиальными выступами и впадинами под действием центробежных сил

При равенстве площадей выступа и впадины центробежная сила Q , действующая на каждую половину круга, определяется по формуле:

$$Q = \gamma \omega^2 R^3 b_1 \cdot (0,67 \left(1 - \frac{m^3}{m_2^3}\right) + 0,33(1 - m_2^3)), \quad (10)$$

где $m = r/R$; $m_2 = R_2/R$, R_2 – радиус окружности, касающейся оснований впадин.

Разделив значение Q на площадь сечения $a-a$, равную $2R(m_2 - m) b_1$, получим средние

напряжения разрыва для цельного круга с выступами и впадинами:

$$\sigma_p = \gamma v^2 (0,33(1 - m^3/m_2^3) - 0,167(1 - m_2^3)) \cdot (m_2 - m)^{-1}. \quad (11)$$

Напряжения растяжения в сечении $k-k$ от действия центробежной силы Q_b (см. рис. 3) равны:

$$\sigma_p = 0,5\gamma v^2(1 - m_1^2), \quad (12)$$

где $0,5(R + R_1)$ – расстояние от оси вращения круга до центра масс радиального выступа; t_1 – протяженность несущего сечения $k-k$; $(t_1 \cdot b_1)$ – его площадь.

Текстуры в шлифовальном круге I создают также высоко концентрированными потоками энергии путем вырезания радиальных (рис. 4, а) или наклонных (рис. 4, б) отверстий 2 длиной l_0 .

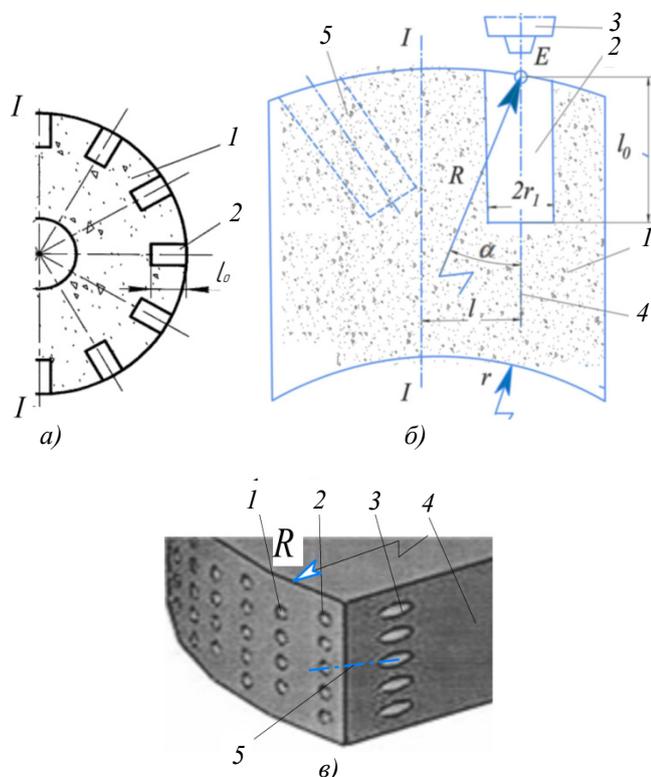


Рис. 4. Шлифовальные круги с вырезанными радиальными (а) и наклонными (б, в) отверстиями

При вырезании радиальных отверстий ось лазерной головки располагают в поперечной плоскости симметрии $I-I$ по радиусу круга, а при вырезании наклонных отверстий головку 3 располагают параллельно плоскости $I-I$ на расстоянии l от неё.

После вырезания ось 4 отверстия 2 и радиус R режущей поверхности, проведенный в точку E , образуют угол α . После поворота круга вокруг своей оси на величину окружного шага отверстие 4 займет позицию 5, а его

где $m_1 = R_1/R$; R_1 – расстояние от сечения $k-k$ до центра O вращения круга.

При выводе формулы (12) центробежная сила Q_b , действующая на радиальный выступ (выше сечения $k-k$), принята равной:

$$Q_b = 0,5t_1b_1\gamma\omega^2(R - R_1)(R + R_1) = 0,5t_1b_1\gamma\omega^2(R^2 - R_1^2), \quad (13)$$

ось будет наклонена к поперечной плоскости симметрии $I-I$ под углом α .

Радиальные и наклонные отверстия вырезают строками, число отверстий в короткой строке 1 меньше на единицу, чем в длинной строке 2 (см. рис. 4, в). В сечении круга плоскостью $I-I$ наклонные отверстия имеют форму эллипсов 3, расположенных в плоскости 4, а их оси занимают наклонное пространственное положение, отмеченное позицией 5. Расстояние l можно варьировать, при этом изменяется значение угла α . Выполнение отверстий наклонными, а также увеличение угла α приводит к возрастанию площади несущего сечения круга, что сказывается на повышении механической прочности текстурированного инструмента.

Напряжения растяжения в несущем продольном сечении $I-I$ шлифовального круга с радиальными вырезанными отверстиями определяются по формуле (см. рис. 4, а):

$$\sigma_p = \frac{m_1 \omega^2 \rho}{(D-d)B-4r_1l_0n_d}, \quad (14)$$

где m_1 – масса половины шлифовального круга; ω , ρ – соответственно угловая скорость и радиус центра масс половины шлифовального круга; $D = 2R$, $d = 2r$; B – соответственно диаметр режущей поверхности, посадочного отверстия и высота круга; r_1 , l_0 – радиус и длина вырезанного отверстия соответственно; n_d – число отверстий в длинной строке.

Напряжения растяжения в несущем продольном сечении шлифовального инструмента с наклонными вырезанными отверстиями, возникающие под действием центробежной силы в процессе испытания инструмента на механическую прочность, равны:

$$\sigma_n = \frac{m_1 \omega^2 \rho}{(D-d)B-2S_3 n_d}, \quad (15)$$

где $S_3 = \pi \cdot a \cdot b$ – площадь эллипса, образованного пересечением вырезанного наклонного отверстия с диаметральной плоскостью $I-I$; $a = r_1$ – длина малой полуоси эллипса, r_1 – радиус отверстия; $b = r_1/\cos\alpha$ – длина большой полуоси эллипса.

На основании формул (1) – (15) определены искомые напряжения в стандартных, цельных кругах с радиальными выступами и впадинами, с приклеенными сегментами, а также в текстурированных кругах. Для оценки прочности шлифовальных кругов приведем напряжения к безразмерному виду, разделив их в формулах (1) – (4), (7) – (9), (11), (12), (14), (15) на γv^2 (Па). При расчете приняты параметры наиболее широко применяемых в машиностроении кругов: $m = 0,5 \dots 1,4$; $m_1 = 0,65$;

$m_2 = 0,63$; $m_{cp} = 0,65$; $m_{b1} = 0,4 \dots 1,0$; $k_b = 1,5 \dots 1,2$; $R = 35 \dots 200$ мм; $n = 6 \dots 12$.

Значения безразмерных напряжений приведены в табл. 1, из которой следует, что в текстурированных кругах наиболее опасные для абразивного материала растягивающие напряжения значительно меньше, чем в стандартных, цельных кругах с радиальными выступами и впадинами, а также кругах с приклеенными сегментами.

1. Безразмерные напряжения в шлифовальных кругах различных конструкций

Конструкция шлифовального круга	Безразмерные напряжения $\frac{\sigma_i}{\gamma v^2}$ (Па)	Примечание
Стандартный круг со сплошной режущей поверхностью	Растяжения.....0,86	$m = 0,5$
Текстурированный круг с закреплением сегментов по торцевым выступам (рис. 1)	Растяжения.....0,49	$n = 6$
	Изгиба:.....1,34	$m_{b1} = 0,4$
2,60	$m_{b1} = 0,6$
Текстурированный круг с закреплением сегментов по осевым выступам (рис. 2)6,00	$m_{b1} = 1,0$
	Растяжения.....0,52	$n = 6$
Текстурированный круг с приклеенными сегментами	Изгиба:.....1,70	от m_{b1} не зависят
	Недостаточная прочность клеевого соединения	$n = 6 \dots 12$
Цельный круг с радиальными выступами и впадинами (рис. 3)	Растяжения.....1,62...2,25	$m_{b1} = 0,5-0,63$
Текстурированный круг с радиальными отверстиями (рис. 4, а)	Растяжения.....0,50	$r/R = 0,32$ $r_1 = 1,5$ мм; $n_d = 10$
Текстурированный круг с наклонными отверстиями (рис. 4, б, в)	Растяжения.....0,46	$r/R = 0,32$ $r_1 = 1,5$ мм; $n_d = 10$

По напряжениям изгиба текстурированные круги, оснащенные сегментами с торцевыми и осевыми выступами, уступают всем остальным кругам, но с учетом того, что допускаемые напряжения изгиба абразивного материала в 3 – 4 раза больше допускаемых напряжений растяжения, можно заключить, что изгибная нагрузка для текстурированных кругов является менее опасной.

В текстурированных кругах с закреплением сегментов за торцевые выступы, изгибная нагрузка зависит от отношения m_{b1}^2 , поэтому при возрастании высоты b_1 режущей поверхности напряжения изгиба быстро увеличиваются, а механическая прочность снижается, что является основным недостатком сегментов с торцевыми выступами. По этой причине абразивные сегменты с торцевыми выступами следует использовать для узких кругов, у которых значения b_1 сравнительно малы. Напряжения изгиба в сегментах с осевыми выступами от отношения m_{b1} не зависят, поэтому осевые выступы можно использовать

для кругов произвольной высоты b_1 без снижения механической прочности. В этом состоит одно из основных достоинств сегментов с осевыми выступами.

Однако следует учитывать, что круги с сегментами с осевыми выступами сложнее в конструктивном исполнении, чем с торцевыми выступами. Поэтому при относительной высоте сегментов $m_{b1} = b_1/R \leq 0,3$ более предпочтительными являются сегменты с торцевыми выступами, а при $m_{b1} > 0,3$ – с осевыми. Прочность приклеенных сегментов определяется прочностью клеевого соединения.

В цельных кругах с радиальными выступами и впадинами напряжения растяжения в опасном сечении $a - a$ (см. рис. 3) больше, чем в стандартном круге, поэтому их прочность ниже прочности стандартных кругов.

Напряжения растяжения в опасном сечении шлифовального круга с вырезанными наклонными отверстиями меньше, чем в круге с радиальными отверстиями. С увеличением радиуса вырезанных отверстий напряжения

растяжения в опасном сечении обоих инструментов возрастают, что объясняется уменьшением площади несущего сечения.

Для проверки результатов выполненного анализа были изготовлены реальные образцы кругов (рис. 5) и проведены их испытания на механическую прочность.

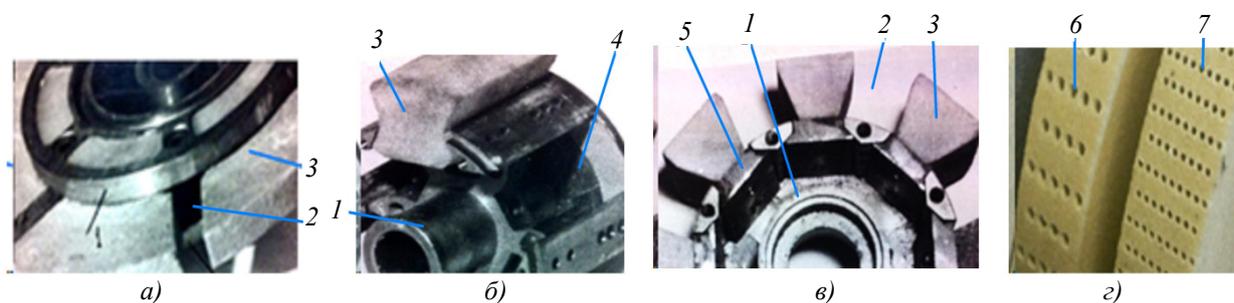


Рис. 5. Реальные образцы текстурированных шлифовальных кругов с сегментами с торцевыми (а), осевыми (б) выступами, с приклеенными сегментами (в) и вырезанными отверстиями (з)

Результаты испытаний показали, что сборные текстурированные круги с осевыми и торцевыми выступами при отношении $m_{b1} \leq 0,3$ характеризуются одинаковой механической прочностью. Другие конструкции шлифовальных кругов значительно уступают им по механической прочности.

Эксперименты подтвердили факт снижения прочности сборного текстурированного круга с сегментами с торцевыми выступами при увеличении высоты b_1 (ширины) режущей поверхности, что соответствует ранее сформулированной рекомендации по использованию сегментов с торцевыми выступами для узких кругов. Круги с сегментами 3, приклеенными к металлическим пластинам 5 (см. рис. 5, в), обладают высокой статической прочностью, поскольку при испытаниях на стенде они выдерживали инерционную силовую нагрузку, характерную для кругов с осевыми выступами. Приклеенные сегменты прочно удерживались в круге также при правке режущей поверхности абразивных сегментов, но в первые же секунды шлифования они отрывались от металлических пластин 5, что объясняется действием высокочастотной вибрации инструмента в процессе шлифования.

Текстурированные круги с вырезанными радиальными 6 и 7 отверстиями (см. рис. 5, з) по напряжениям растяжения не уступают кругам с торцевыми и осевыми выступами, но в текстурированных кругах возникают также напряжения среза в плоскостях, соединяющих оси вырезанных отверстий. Поэтому круги с вырезанными отверстиями уступают по прочности кругам с торцевыми и осевыми выступами примерно на 3...5 %, но их можно ис-

пользовать для шлифования изделий на более высоких режимах резания по сравнению со стандартными кругами.

Таким образом, для реализации интенсивных процессов шлифования к практическому использованию рекомендуются текстурированные круги с торцевыми и осевыми выступами, которые обеспечивают высокую статическую и динамическую механическую прочность абразивных сегментов и выдерживают значительно более высокие рабочие нагрузки по сравнению с другими рассмотренными шлифовальными кругами.

Результаты экспериментов показали, что текстурированными кругами можно проводить обработку при поперечных подачах, в 5 раз превышающих подачи стандартного круга. После шлифования тщательно осматривали режущую поверхность сегментов, вырезанные радиальные отверстия круга, при этом сколов, отрывов полезно используемой части абразивного материала и других разрушений абразивного материала, а также вырывания блоков абразивных зерен не обнаружено.

Шлифование стандартными кругами при $S_n \geq 0,4$ мм/мин приводило к быстрому засаливанию круга и потере его режущей способности, поэтому процесс обработки прекращали и проводили вынужденную правку круга. Шлифование текстурированными кругами при поперечной подаче $S_n = 2$ мм/мин сопровождалось образованием на сегментах и в области радиальных отверстий заборной поверхности, после чего инструменты сохраняли свою режущую способность продолжительное время, не требуя правки режущей поверхности.

Шероховатость поверхности после предва-

рительного шлифования отверстий колец текстурированным кругом без выхаживания при подаче $S_n = 2$ мм/мин составила $R_a = 1,2...1,4$ мкм, при $S_n = 0,4$ мм/мин – $0,6$ мкм, а при шлифовании стандартным кругом при $S_n = 0,4$ мм/мин – $R_a = 0,5$ мкм. После выхаживания в течение 4 с поверхности, подвергнутой предварительному шлифованию текстурированным кругом при подаче $S_n = 2$ мм/мин, шероховатость составила $R_a = 0,45...0,43$ мкм, а после выхаживания стандартным кругом $R_a = 0,43...0,42$ мкм.

Обсуждение результатов

Сравнение шероховатости поверхностей, шлифованных стандартным и текстурированным кругами показало, что среднее арифметическое отклонение профиля после предварительной обработки колец подшипников текстурированными кругами без выхаживания больше по сравнению со стандартными кругами примерно на 20 %, а после выхаживания превышение составило не более 5 %.

Анализ напряженного состояния различных шлифовальных кругов показал, что текстурированные круги, оснащенные абразивными сегментами с торцевыми и осевыми выступами, и круги с вырезанными отверстиями являются более прочными по сравнению с известными рассмотренными кругами.

В текстурированных кругах с вырезанными радиальными отверстиями наиболее напряженная область посадочного отверстия не устранена, однако их механическая прочность выше по сравнению с прочностью стандартных шлифовальных кругов. Этот факт объясняется тем, что в процессе вырезания большого количества радиальных или наклонных отверстий малого диаметра масса абразивного материала в полезно используемом абразивном слое существенно уменьшается, что приводит к уменьшению центробежных сил, а следовательно, и растягивающих напряжений в сечении $I-I$.

Таким образом, для реализации интенсивных процессов шлифования металлов и сплавов в условиях подшипниковых и других машиностроительных заводов рекомендуются к использованию текстурированные шлифовальные круги, обеспечивающие высокую механическую прочность.

Выводы

1. Анализ априорной информации в области совершенствования конструкций инструментов и процессов шлифования показал, что сравнительно быстро развивается направление, связанное с исследованием текстурированных кругов и процессов шлифования на их основе, что обусловлено сравнительно малыми временными, материальными и трудовыми затратами на их реализацию и повышением производительности процессов обработки.

2. Разработаны математические модели растягивающих напряжений и напряжений изгиба, возникающих в опасных несущих сечениях стандартных, цельных кругов с радиальными выступами и впадинами, сборных текстурированных кругов, а также кругов с текстурами, выполненными высококонцентрированными потоками энергии, что позволило сравнить механическую прочность инструментов.

3. Наибольшие значения опасных напряжений растяжения возникают в абразивном материале стандартного круга, круга с радиальными выступами и впадинами, а наибольшие напряжения изгиба – в сборных текстурированных кругах, оснащенных абразивными сегментами с торцевыми выступами, предназначенными для закрепления сегментов в металлическом корпусе. Напряжения изгиба в сегментах с торцевыми выступами существенно зависят от высоты b_1 режущей поверхности, поэтому эти сегменты рекомендуются использовать для узких шлифовальных кругов с отношением $m_{b1} = b_1/R \leq 0,3$ (R – радиус режущей поверхности).

4. Напряжения изгиба в абразивных сегментах с осевыми выступами в сборных текстурированных кругах не зависят от отношения m_{b1} , но эти круги сложнее в конструктивном исполнении по сравнению с кругами, оснащенными сегментами с торцевыми выступами, поэтому осевые выступы рекомендуются использовать для шлифовальных кругов с отношением $m_{b1} > 0,3$.

5. Сборные текстурированные круги и круги с текстурами, выполненными высококонцентрированными потоками энергии, характеризуются более высокой механической прочностью и производительностью обработки по сравнению с рассмотренными инструментами, поэтому их следует использовать для реализации интенсивных процессов шлифования подшипниковых сталей и других материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гусев, В.Г., Морозов, А.В. Плоское периферийное шлифование дискретными кругами: монография. – Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2012. – 222 с.
2. Пат. 2582841С1 Российская Федерация, В24D, 5/02. Шлифовальный инструмент с дискретной режущей поверхностью / Морозов А.В., Гусев В.Г., Швагирев П.С.; опубл. 2016. – Бюл. №12.
3. Гусев, В.Г., Морозов, А.В. Технология дискретизации рабочих поверхностей шлифовальных кругов лазером и гидроабразивной струей // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2017. – №9 (75). – С. 20-27.
4. Морозов, А.В. Износ алмазного инструмента при правке дискретных шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. – 2016. – №3. – С. 59-64.
5. Гусев, В.Г., Калиновская, Е.В. Моделирование температуры обрабатываемой поверхности при комбинированном плоском периферийном шлифовании // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2018. – №6 (84). – С. 23-30.
6. Гусев, В.Г., Калиновская, Е.В. Влияние отношения высот кругов в комбинированном инструменте на шероховатость шлифованной поверхности // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2021. – №5 (119). – С. 14-18.
7. Hao Nan Li, Dragos Axinte. Textured grinding wheels: A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001>.
8. Jackson M.J., Hitchiner M.P. High performance grind-

ing and advanced cutting tools, Springer Verlag, 2012.

REFERENCES

1. Gusev, V.G., Morozov, A.V. *Ploskoe periferiynoe shlifovanie diskretnimi krugami. Monografiya* [Flat peripheral grinding with discrete disks. Monograph], Yoshkar-Ola: Colloquium, 2012, 222 p.
2. Pat. No.2582841C1 the RF, B24D, 5/02. Grinding tool with a discrete cutting surface / Morozov A.V., Gusev V.G., Shvagirev P.S., publ. 2016, bull. no. 12.
3. Gusev, V.G., Morozov, A.V. Technology of grinding wheels working surface discretization with laser and hydroabrasive jet. /Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2017, no. 9(73), pp. 20-27.
5. Gusev, V.G., Kalinovskaya, E.V. Temperature simulation of working surface in the combined flat peripheral grinding operation. /Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2018, no. 6 (84), pp. 23 30.
6. Gusev, V.G., Kalinovskaya, E.V. Influence of high dimension ratio of wheels in a combined tool on the roughness of a grinding finish. /Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2021, no. 5 (119), pp.14 18.
9. Hao Nan Li, Dragos Axinte. Textured grinding wheels: A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001>.
8. Jackson M.J., Hitchiner M.P. High performance grinding and advanced cutting tools, Springer Verlag, 2012.

Статья поступила в редакцию 21.11.2021; одобрена после рецензирования 01.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

The article was submitted 21.11.2021; approved after reviewing 01.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.

