

Научная статья  
УДК 62-1/-9  
doi:10.30987/2223-4608-2022-1-29-36

## Температура отверстий колец подшипников при шлифовании сборным текстурированным кругом

Владимир Григорьевич Гусев, д.т.н.

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Россия  
prof\_gusev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6514-8522>

**Аннотация.** Рассмотрена проблема снижения тепловой напряженности процесса шлифования колец подшипников. Показана возможность уменьшения температуры обрабатываемой поверхности на основе применения сборных текстурированных шлифовальных кругов. Установлены экспериментальные модели импульсной, контактной, средней температуры, скоростей и темпов их изменения в функции времени шлифования.

**Ключевые слова:** шлифование, текстурированный круг, температура, модель, режим резания

**Для цитирования:** Гусев В.Г. Температура отверстий колец подшипников при шлифовании сборным текстурированным кругом // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №1(127). – С. 29-36.  
doi:10.30987/2223-4608-2022-1-29-36.

Original article

## The temperature of the holes of the bearing rings when grinding with a precast textured wheel

Vladimir G. Gusev, IR DR

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

**Annotation.** The problem of reducing the thermal stress of the grinding process of bearing rings has been viewed. The possibility of reducing the temperature of the treated surface based on the use of precast textured grinding wheels has been presented. Experimental models of pulse, contact, average temperature, velocities and rates of their change in the function of grinding time are found.

**Keywords:** grinding, textured wheel, temperature, sample component, cutting conditions

**For citation:** Gusev V.G. The temperature of the holes of the bearing rings when grinding with a precast textured wheel. / Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022, No. 1(127), pp. 29-36.  
doi: 10.30987/2223-4608-2022-1-29-36.

### Введение

Повышение качества и производительности процессов шлифования металлов и сплавов возможно на основе разработки новых конструкций инструментов и процессов шлифования, обеспечивающих снижение тепловыделений в зоне резания и интенсификацию отвода тепла [1 – 4]. Разработаны высокопористые

[1], композиционные [2], текстурированные шлифовальные круги [3], а также круги, характеризующиеся использованием различных составов абразивных зерен и диоксида хрома [4], позволяющие расширить диапазон режимов бездефектной обработки, а следовательно, повысить производительность и качество шлифованного поверхностного слоя.

Среди известных направлений совершенст-

ования процессов шлифования активно развивается обработка текстурированными кругами [5]. Актуальность этого направления исследований обусловлена потенциальными резервами в повышении производительности и качества шлифованных изделий и в определенной степени подтверждается созданием международного научного коллектива ученых Китайской Народной Республики и Великобритании [3], успешно работающих в этой области.

Значительного снижения температуры в зоне шлифования можно достичь генерированием инструментом мощных аэродинамических потоков [6], разгоном смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) до скорости резания, созданием гидродинамических клиньев с повышенным давлением СОЖ, а также высокочастотным прерыванием процесса шлифования во времени [7].

В работе [8] предложена методика определения температуры при шлифовании стандартными (сплошными), прерывистыми и высокопористыми шлифовальными кругами на основе представления теплового процесса как единого цикла нагрева и охлаждения. Протоходу СОЖ в зону резания препятствует плотный воздушный поток, окружающий быстро вращающийся шлифовальный круг [8].

В работе [9] рассмотрено влияние расхода и скорости струи на эффективность смазочно-охлаждающей жидкости, уделено внимание подавлению воздушного слоя, окружающего быстро вращающийся шлифовальный круг и препятствующего проникновению СОЖ в зону резания. Отмечено, что при центробежной подаче СОЖ через вращающийся круг можно снизить негативное влияние воздушного барьера.

Система подачи охлаждающей жидкости под высоким давлением оказалась самой эффективной [9], однако она требует дополнительных затрат, связанных с использованием гидросистемы, создающей высокое давление СОЖ.

Сборные текстурированные круги генерируют значительно более мощные аэродинамические потоки, поскольку выступающие из металлического корпуса абразивные сегменты представляют собой лопасти, вращающиеся на высокой скорости, поэтому проблема доставки хладагента в зону шлифования сборными текстурированными кругами стоит особо остро [7].

Решение этого вопроса найдено путем создания конструкций сборных текстурирован-

ных шлифовальных кругов; кругов с текстурами, выполненными высококонцентрированными потоками энергии (лазерным лучом и гидроабразивной струей высокого давления), а также устройств для подачи СОЖ, обеспечивающих способ подачи, при котором шлифовальный круг самостоятельно всасывает хладагент в инструмент, генерирует высокую скорость течения и давление в зоне резания [5]. При этом использование специальной гидростанции, генерирующей высокое давление СОЖ, не требуется.

В таких условиях шлифования металлов и сплавов можно ожидать существенного снижения температуры обрабатываемой поверхности.

Изменение исходной структуры обрабатываемого материала происходит под действием импульсной температуры, создаваемой элементарными резами абразивных зерен. Совокупное действие этих резов вызывает повышение контактной и средней температуры шлифуемой поверхности, в этой связи целесообразно исследовать не только импульсную  $T_L$ , но и контактную  $T_k$ , среднюю  $T_s$  температуры обрабатываемой поверхности [5]. Однако исследованию указанных температур, а тем более скоростей и темпов их изменения при шлифовании перспективными текстурированными кругами, не уделялось внимания.

Целью исследования является снижение тепловой напряженности процесса шлифования отверстий колец подшипников сборными текстурированными кругами на основе разработки и использования экспериментальных моделей абсолютных значений импульсной, контактной и средней температуры обрабатываемой поверхности, скоростей и темпов их изменения в функции времени шлифования.

### Материалы и методы исследования

На внутришлифовальном станке мод. ЗА227В обрабатывали отверстия колец подшипников 7214 из материала ШХ-15 твердостью 61...63 HRC<sub>э</sub>. В качестве режущих инструментов использовали стандартный шлифовальный круг ПП 63×50×20 25F90LV (ГОСТ Р 52381-2005, ГОСТ Р 52587-2006) и сборный текстурированный круг 63×50×20×6 с числом сегментов  $n_c = 6$  и аналогичной характеристикой абразивного материала.

Отверстия шлифовали при условиях: частота вращения круга 13 600 мин<sup>-1</sup>; частота двойных ходов инструмента 100 дв. ход/мин; ча-

стота вращения заготовки  $600 \text{ мин}^{-1}$ ; поперечная (радиальная) подача заготовки  $10,0 \dots 33,3 \text{ мкм/с}$ . Расход пятипроцентного водного раствора эмульсола Аквол-10М составил  $5,01 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ .

При шлифовании стандартным кругом СОЖ подавали по схеме, используемой в подшипниковой промышленности, при шлифовании сборным текстурированным кругом – через конструкцию быстро вращающегося инструмента. Для регистрации температуры использовали полуискусственную термопару. Темп изменения температуры шлифуемой по

верхности рассчитывали по формуле:

$$m_i = (dT_i/d\tau) / (T_i - T_{ci}), \quad (1)$$

где  $T_i$  – текущее значение абсолютных значений температур  $T_s, T_k$  и  $T_L$ ;  $T_{ci}$  – текущее значение температуры СОЖ, вытекающей из зоны резания.

### Результаты исследования

После обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, связывающие абсолютные значения температур  $T_s, T_k$  и  $T_L$ , скорости  $dT_i/d\tau$  и темпы  $m_i$  их изменения в функции времени шлифования (табл. 1).

#### 1. Зависимости температур $T_s, T_k$ и $T_L$ , скоростей и темпов их изменения в функции времени шлифования

№ кривой	Уравнения регрессии	Скорость изменения температуры, °С/с	Темп изменения температуры, с <sup>-1</sup>
Рис. 1	Шлифование сборным текстурированным кругом, $\tau \in [0; 15] \text{ с}$		
1–4	$T_s = a_i\tau + b,$ $b = 18 \text{ °С}$ $a_1 = 0,5; a_2 = 0,7;$ $a_3 = 0,9; a_4 = 1,03;$	$v_1 = 0,5$ $v_2 = 0,7$ $v_3 = 0,9$ $v_4 = 1,03$	$m_1 = m_4 = \tau^{-1}$
Рис. 1	Шлифование стандартным кругом, $\tau \in [0; 15] \text{ с}$		
5	$T_s = 15,6 + 3,4\tau - 0,10\tau^2$	$v_5 = 3,4 - 0,2\tau$	$m_5 = v_5/(3,4\tau - 0,092\tau^2)$
6	$T_s = 16,1 + 3,8\tau - 0,11\tau^2$	$v_6 = 3,8 - 0,22\tau$	$m_6 = v_6/(3,8\tau - 0,106\tau^2)$
7	$T_s = 16,3 + 4,3\tau - 0,12\tau^2$	$v_7 = 4,3 - 0,24\tau$	$m_7 = v_7/(4,3\tau - 0,113\tau^2)$
8	$T_s = 15,2 + 5,4\tau - 0,11\tau^2$	$v_8 = 5,4 - 0,22\tau$	$m_8 = v_8/(13,4\tau - 0,11\tau^2)$
Рис. 2	Шлифование сборным текстурированным кругом, $\tau \in [0; 15] \text{ с}$		
1	$T_k = 63,0 + 1,2\tau$	$v_1 = 1,2$	$m_1 = 0,4/(0,4\tau + 15,7)$
2	$T_k = 70,5 + 3,6\tau$	$v_2 = 3,3$	$m_2 = 1,1/(1,1\tau + 18,2)$
3	$T_L = 75,0 + 6,0\tau$	$v_3 = 6,0$	$m_3 = 2,0/(2,0\tau + 19,7)$
4	$T_L = 78,3 + 3\tau + 0,4\tau^2$	$v_4 = 3,0 + 0,8\tau$	$m_4 = 3v_4/(21 + 0,98\tau + 0,14\tau^2)$
Рис. 2	Шлифование стандартным кругом, $\tau \in [0; 15] \text{ с}$		
5	$T_L = 84,2 + 0,8\tau + 0,96\tau^2$	$v_5 = 0,8 + 1,92\tau$	$m_5 = 3v_5/(24 + 0,27\tau + 0,32\tau^2)$
6	$T_L = 122,7 - 8,3\tau + 2,0\tau^2$	$v_6 = -8,3 + 4,0\tau$	$m_6 = 3v_6/(36 - 2,8\tau + 0,7\tau^2)$

Уравнения регрессии, связывающие абсолютные значения температур  $T_s, T_k$  и  $T_L$ , скоростей  $dT_i/d\tau$  и темпов  $m_i$  их изменения с временем шлифования сборным текстурированным кругом, представляют собой линейные зависимости, а стандартным кругом – криволинейные. Для обоих инструментов температура  $T_s$  увеличивается с течением времени шлифования ( $\tau \in [0; 15] \text{ с}$ ). При обработке сборным текстурированным кругом с поперечной подачей заготовки  $S_n = 10 \text{ мкм/с}$  абсолютные значения  $T_s$  меньше примерно в 2 раза, а при  $S_n = 20 \text{ мкм/с}$  в 2,6 раза по сравнению со стандартным кругом.

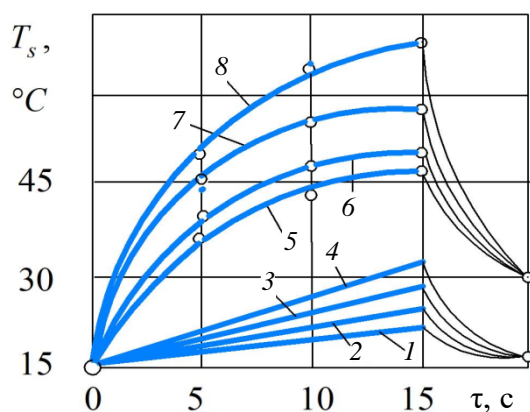
При шлифовании сборным текстурированным кругом увеличение поперечной подачи бабки изделия от  $10,0$  до  $33,3 \text{ мкм/с}$  вызывает

возрастание скорости  $dT_i/d\tau$  от  $0,5$  до  $1,03 \text{ °С/с}$ , а сплошным кругом увеличение подачи от  $10$  до  $20 \text{ мкм/с}$  приводит к возрастанию скорости от  $0,65$  до  $5,2 \text{ °С/с}$ , т.е. скорость повышения средней температуры  $T_s$  при сплошном шлифовании выше в  $1,3 - 5,0$  раз в зависимости от времени обработки. С увеличением времени шлифования сплошным кругом скорость повышения средней температуры  $dT_i/d\tau$  уменьшается, а при  $\tau = 15 \text{ с}$  она принимала значение в пределах от  $1,0$  до  $1,3 \text{ °С/с}$ .

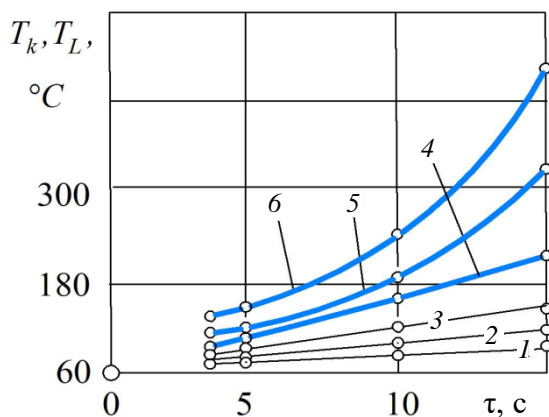
Анализ зависимостей темпа возрастания средней температуры  $T_s$  показал, что при шлифовании сборным текстурированным кругом темп выше в  $1,03 - 1,77$  раза, что объясняется низкими абсолютными значениями тем-

пературы  $T_s$  при шлифовании сборным текстурированным кругом. Несмотря на более низкую скорость  $dT_s/d\tau$ , темп нагревания обрабатываемой поверхности текстурированным кругом выше по сравнению со стандартным (сплошным) кругом, что объясняется небольшим значением члена  $(T_i - T_{ci})$ , стоящего в знаменателе формулы (1).

Средняя температура  $T_s$  поверхности при шлифовании сборным текстурированным кругом в функции времени описывается прямыми линиями 1 – 4, а при шлифовании стандартным кругом – кривыми 5 – 8 (рис. 1, а).



а)



б)

**Рис. 1. Изменение средней температуры:**

а – температуры поверхности  $T_s$  при шлифовании текстурированным кругом (прямые 1 – 4), стандартным кругом (кривые 5 – 8); б – контактной  $T_k$  и импульсной  $T_L$  температур текстурированным кругом (прямые 1 – 3), стандартным кругом (кривые 4 – 6)

Из рис. 1 видно, что средняя температура  $T_s$  поверхности при обработке сплошным и сборным текстурированным кругом в течение 15 секунд увеличивается, при этом абсолютные значения температура  $T_s$  при шлифовании сборным текстурированным кругом в несколько раз ниже по сравнению со стандарт-

ным кругом. По истечении 15 секунд процесс шлифования прекращали, при этом заготовка остывала, что отражено на графиках тонкими экспоненциальными линиями, характеризующими уменьшение температуры в промежутке времени от 15-й до 20-й секунды.

Изменение контактной  $T_k$ , локальной  $T_L$  температуры в зависимости от времени шлифования текстурированным кругом описываются также линейными зависимостями (см. рис. 1, б, прямые 1 – 3), а при сплошном шлифовании – кривыми 5 и 6. Увеличение поперечной подачи до 26,7 мкм/с приводит к возникновению нелинейности в изменении локальной температуры также для текстурированного круга (кривая 4).

С увеличением времени шлифования  $\tau$  и поперечной (радиальной) подачи  $S_n$  заготовки разность абсолютных значений каждой из температур  $T_k$  и  $T_L$  для сравниваемых инструментов (сплошного и текстурированного кругов) возрастает, что свидетельствует о более полном использовании преимуществ последнего при снятии больших припусков и при высоких поперечных подачах. Иными словами, наибольший эффект от использования сборных текстурированных шлифовальных кругов достигается при реализации интенсивных процессов обработки.

Отношение скоростей температур при шлифовании стандартным  $T_{st}$  и текстурированным  $T_{tr}$  кругом  $(T_{st} / d\tau) / (T_{tr} / d\tau)$ , а также темпов  $m_{st} / m_{tr}$  достигает до 9 и 3 единиц соответственно, что свидетельствует о возможности существенного снижения температуры обрабатываемой поверхности при использовании текстурированных кругов.

Средняя температура поверхности, шлифуемой сборным текстурированным кругом, ниже по сравнению со стандартным кругом в 1,2, контактная  $T_k$  – в 1,04 – 3,10, а локальная  $T_L$  – в 1,23 – 2,80 раза, в зависимости от времени шлифования, что подтверждает высокую эффективность применения текстурированного инструмента.

На температуру  $T_s$  существенное влияние оказывают поперечная подача  $S_n$  бабки изделия и удельный съем металла  $q_m$ , который представляет собой абсолютный съем металла в единицу времени, приходящийся на единицу высоты режущей поверхности инструмента.

Рост средней температуры с увеличением подачи  $S_n$  при шлифовании стандартным кругом характеризуется кривой 1 (рис. 2, а), имеющей крутой подъем, в то время как для тек-

стируемого круга он описывается прямой 2, расположенной на близком расстоянии от оси абсцисс.

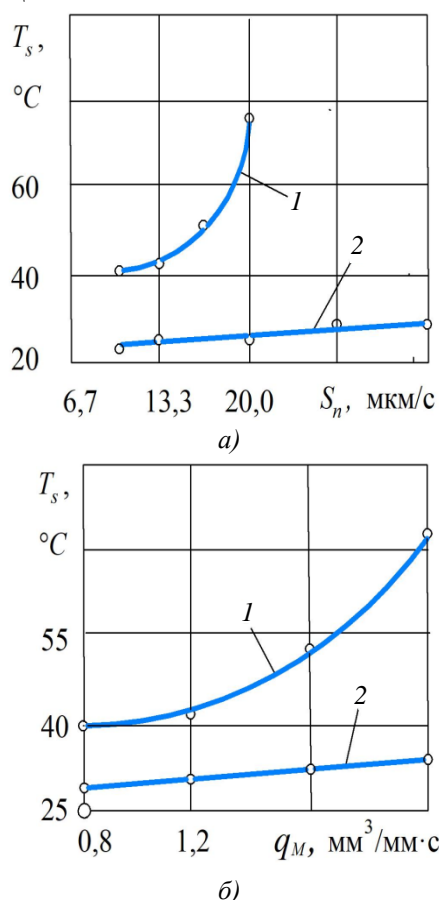


Рис. 2. Изменение средней температуры обрабатываемой поверхности в функции поперечной подачи шлифовального круга (а) и скорости удельного съема металла (б)

Температура  $T_s$  шлифуемой поверхности изменяется аналогично в зависимости от удельного съема металла (см. рис. 2, б). Эти результаты свидетельствуют о правомерности ранее сделанного вывода относительно более эффективного снижения абсолютных значений температуры при шлифовании текстурированным кругом при интенсивных режимах резания.

Текстурированный круг позволяет подавать СОЖ в зону резания через вращающуюся конструкцию и одновременно через поры абразивных сегментов. Проведенный эксперимент показал, что поры абразивных сегментов в процессе шлифования засоряются, что приводит к повышению температуры. В подтверждение сказанному шлифовали без и с охлаждением отверстия колец подшипника стандартным и текстурированным кругом.

В течение 25...30 мин шлифования с при-

менением СОЖ поры сегментов засорились твердыми частицами СОЖ. Факт засорения оценивали с помощью микроскопа после разрушения сегментов, при этом в местах разлома абразивный материал имеет серый цвет с мельчайшими частицами отходов шлифования (шлама).

Несмотря на прерывистость режущей поверхности, температура поверхности заготовки при обработке сегментами текстурированного круга с засоренными порами превышала примерно на 15 % температуру при шлифовании сплошным кругом с чистыми порами. Положительный эффект от подачи СОЖ через поры абразивных сегментов при шлифовании отверстий колец подшипников наблюдался непродолжительное время, а сегменты с забитыми шламом порами оказались не пригодными для дальнейшего использования.

Применение средств для тонкой очистки СОЖ, с целью исключения засорения пор, увеличивает технологическую себестоимость операции шлифования и не позволяет устранить засорения в полной мере из-за наличия в абразивном материале сегментов как сравнительно крупных, так и мелких пор.

В этих условиях подача СОЖ на водной основе через поры абразивных сегментов текстурированного круга не рекомендуется, а подача чистой масляной СОЖ через поры в зону резания требует сепарации двух разнородных жидкостей, которые смешиваются в процессе шлифования. Процесс сепарации также требует дополнительных затрат. Наиболее эффективное действие СОЖ достигается при центробежном способе её подачи через радиальные отверстия, выполненные в металлическом корпусе текстурированного круга.

Для экспериментального исследования движения СОЖ в зоне резания были изготовлены сборный текстурированный шлифовальный круг и устройство для её подачи (рис. 3).

Сборный текстурированный круг, состоящий из металлического корпуса 1, абразивных сегментов 2, установлен на шпинделе 3 внутришлифовального станка. Рабочие движения исполнительных органов при обработке:  $D_r$ ,  $D_{spr}$  – соответственно направление главного движения резания и движения продольной подачи текстурированного круга;  $D_{sr}$ ,  $D_{sk}$  – соответственно поперечная и круговая подача заготовки. Для размещения СОЖ во вращающемся сборном текстурированном круге в корпусе выполнена кольцевая приемная полость 4.



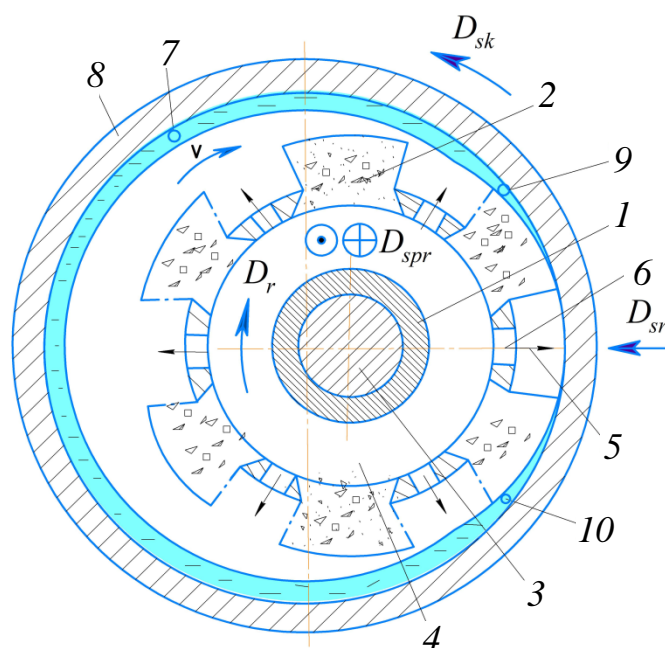


Рис. 3. Течение СОЖ при шлифовании отверстия сборным текстурированным кругом

### Обсуждение результатов

Движение хладагента в процессе шлифования отверстий сборным текстурированным кругом оказывает доминирующее влияние на скорость отвода образующегося в зоне резания тепла. В процессе быстрого вращения сборного текстурированного круга хладагент, находящийся в приемной полости, под действием центробежной силы мгновенно выбрасывается в направлении стрелок 5 через отверстия 6 на обрабатываемую поверхность заготовки (рис. 4, а).

Образуется слой жидкости 7, который движется по стрелке  $v$  с высокой скоростью по обрабатываемой поверхности, при этом на входе и выходе абразивных сегментов из контакта с заготовкой 8 образуются гидродинамические клинья 9 и 10, в которых создается повышенное давление хладагента.

Течение СОЖ через устройство для подачи, через не вращающийся и вращающийся текстурированный шлифовальный круг представлено на рис. 4. При не вращающемся круге СОЖ от насоса по трубопроводу 1 поступает в устройство 2 откуда она в сравнительно малом объеме проходит внутрь круга 3 (см. рис. 4, а). Основная масса СОЖ от насоса в виде потоков 4 и 5 проходит через цилиндрические зазоры между не вращающимся устройством 2 для подачи СОЖ, шпинделем шлифовального станка и корпусом круга, минуя приемную полость инструмента. На выходе из отверстий 6 металлического корпуса ин-

струмента образуется сравнительно малый поток 7 хладагента.

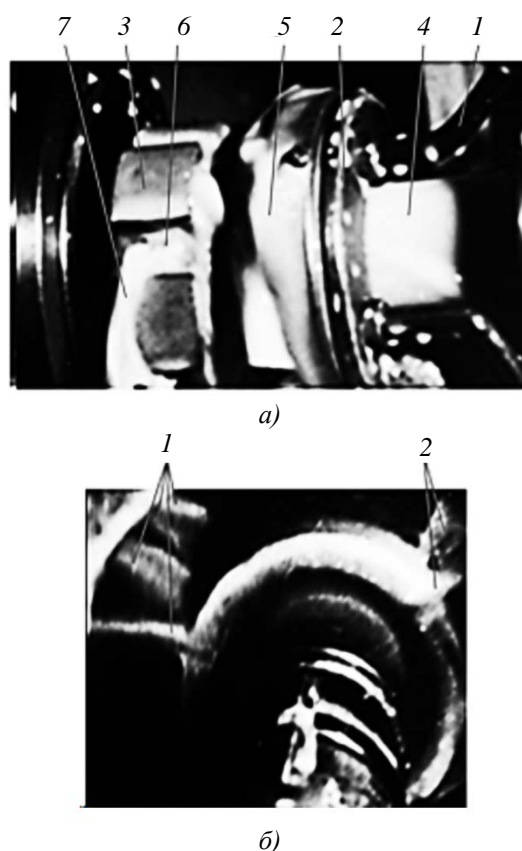


Рис. 4. Течение СОЖ через реальный не вращающийся (а) и вращающийся текстурированный круг (б)

В процессе шлифования в результате быстрого выброса хладагента из приемной полости в последней образуется разрежение, что вы-

зывает всасывание жидкости внутрь круга из устройства для подачи СОЖ. Иными словами, сборный текстурированный инструмент работает как насос, транспортирующий СОЖ от устройства 2 в зону шлифования в виде мощных радиальных струй 1 и 2 (см. рис. 4, б).

Движение СОЖ по обрабатываемой поверхности заготовки с высокой скоростью, формирование на входе и выходе сегмента из контакта с заготовкой двух гидродинамических клиньев с повышенным давлением жидкости; мощные воздушные потоки, генерируемые сегментами в процессе шлифования, а также высоко частотное прерывание процесса резания – все это обеспечивает не только снижение тепловыделений в зоне резания, но и интенсивный конвективный отвод тепла, что приводит к значительному снижению температуры поверхности заготовки по сравнению с известными шлифовальными инструментами.

### Заключение

1. Изменение исходной структуры обрабатываемого металла происходит под действием импульсной температуры  $T_L$ , создаваемой элементарными резами абразивных зерен, совокупное действие которых вызывает повышение контактной  $T_k$  и средней  $T_s$  температуры шлифуемой поверхности. Снижение абсолютных значений этих температур на основе сборных текстурированных кругов можно рассматривать как один из эффективных путей совершенствования процессов шлифования.

2. На основании обработки экспериментальных данных внутреннего шлифования отверстий колец подшипников стандартным и сборным текстурированным кругом определены уравнения регрессии, связывающие абсолютные значения  $T_L, T_k$  и  $T_s$ , скорости и темпы их изменения со временем шлифования.

3. Средняя температура  $T_s$  поверхности при шлифовании сборным текстурированным кругом ниже по сравнению со сплошным (стандартным) кругом в 1,2; контактная  $T_k$  – в 1,04 – 3,10 и локальная  $T_L$  – в 1,23 – 2,80 раза в зависимости от времени шлифования. Увеличение поперечной подачи заготовки от 10 до 33,3 мкм/с при шлифовании отверстий колец подшипников сборным текстурированным кругом вызывает возрастание скорости температуры  $T_s$  от 0,5 до 1,03 °C/с, а для сплошного круга увеличение подачи от 10 до 20 мкм/с – к возрастанию  $T_s$  от 0,65 до 5,2 °C/с, что выше в

1,3 – 5,0 раз в зависимости от времени обработки.

4. С увеличением времени шлифования и поперечной подачи заготовки разность абсолютных значений каждой из температур  $T_s, T_k$  и  $T_L$  для сравниваемых инструментов (сплошного и текстурированного кругов) возрастает, что свидетельствует о том, что наибольший эффект от использования сборного текстурированного круга обеспечивается при снятии больших припусков и при форсированных режимах резания.

5. Значительное снижение тепловой напряженности процесса внутреннего шлифования колец подшипников сборным текстурированным кругом объясняется высокой скоростью течения СОЖ по обрабатываемой поверхности, повышенным её давлением в зоне контакта заготовки с абразивными сегментами, мощными аэро- и гидродинамическими потоками, генерируемыми инструментом, а также высокочастотным прерыванием процесса резания.

6. Экспериментальные модели импульсной  $T_L$ , контактной  $T_k$  и средней  $T_s$  температуры шлифуемой поверхности, а также моделей скоростей и темпов их изменения являются необходимой проектной базой для разработки эффективных технологических процессов шлифования и управления тепловой напряженностью в зоне шлифования сборными текстурированными кругами.

Результаты исследований рекомендуются к использованию в условиях машиностроительных и др. заводов, реализующих высокопроизводительные процессы шлифования закаленных до высокой твердости сталей, твердых сплавов и других материалов, склонных к образованию дефектов в поверхностном слое под действием высокой температуры.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Старков, В.К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
2. Худобин, Л.В., Веткасов, Н.И. Шлифование композиционными кругами // Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 256 с.
3. 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>.
4. Бутенко, В.И., Гусакова, Л.В., Кулинский, А.Д. Перспективные направления повышения эффективности шлифования поверхностей деталей машин // Брянск: Вестник БГТУ, 2016. – Т. 2. – №2. – С. 112-120.

5. Гусев, В.Г., Морозов, В.В. Технология плоского дискретного шлифования: учеб. пос. // Владимир: ВлГУ, 2007. – 343 с.

6. Gusev, V.G. Aerodynamic streams at cylindrical internal grinding by the textured wheels. MATEC Web of Conf. 298, 00018, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800018>, ICMTMTE 2019.

7. Морозов, А.В. Повышение эффективности плоского шлифования на основе разработки инструментов и процессов высокочастотного дискретного резания: автореф. дис... д-ра техн. наук. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 33 с.

8. Лищенко, Н.В., Ларшин, В.П. Температура при шлифовании прерывистыми и высокопористыми кругами // Брянск ТГУ: Вектор науки, 2015. – №3-1 (33-1). – С. 75-83.

9. Ермолаев, В.К. Развитие техники подачи СОЖ при шлифовании // М.: Станкин, 2019. – С. 10-16.

## REFERENCES

1. Starkov, V.K. Grinding by high porous wheels. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 688 p.

2. Khudobin, L.V., Vetkasov, N.I. Grinding by composite wheels, Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2004, 256 p.

3. 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>.

4. Butenko, V.I., Gusakova, L.V., Kulinsky, A.D. Promising directions to increase grinding efficiency in machine parts surfaces, Bryansk, Bulletin of Bryansk state technical university, 2016, Vol. 2, No. 2, pp. 112-120.

5. Gusev, V.G., Morozov, V.V. Technology of flat discrete grinding. Textbook, Vladimir: VSU, 2007, 343 p.

6. Gusev, V.G. Aerodynamic streams at cylindrical internal grinding by the textured wheels. MATEC Web of Conf. 298, 00018, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800018>, ICMTMTE 2019.

7. Morozov, A.V. Improving the efficiency of flat grinding based on the development of tools and processes of high-frequency discrete cutting: extended abstract of D.Sc. thesis Doctor of Technical Sciences, Moscow: MGTU (Bauman Moscow State Technical University), 2020, 33 p.

8. Lischenko, N.V., Larshin, V.P. Temperature during grinding by interrupted and highly porous wheels. / Bryansk TSU: Vector nauki, 2015, No.3-1 (33-1), pp. 75-83.

9. Ermolaev, V.K. Development of cooling supply technology during grinding. Moscow: Stankin, 2019, pp. 10-16.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.11.2021; одобрена после рецензирования 01.12.2021; принята к публикации 10.12.2021.

The article was submitted 15.11.2021; approved after reviewing 01.12.2021; accepted for publication 10.12.2021.

