

УДК 621.9.01

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРЕРЫВИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ**

Якимов А.А., д.т.н.,  
Бовнегра Л.В., к.т.н.,  
Безнос С.В.,  
Дмитриева С.Ю.,  
Добровольский В.В.

*Одесский национальный политехнический университет (Украина)*

*В работе рассматривается влияние геометрических параметров прерывистых шлифовальных кругов с прямыми пазами на их относительный износ, температуру в зоне резания и параметрическую устойчивость упругой системы, а также, с целью обеспечения геометрических показателей качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей, обоснована возможность применения прерывистых шлифовальных кругов с наклонными пазами и предложена методика расчета размеров геометрических элементов.*

*Ключевые слова: область параметрического резонанса, динамическая жесткость резания, прерывистый круг.*

**Постановка проблемы.** В процессе шлифования в зоне контакта абразивного инструмента с обрабатываемой деталью возникают температуры, достигающие 800°-1600°С, из-за чего в поверхностном слое металла происходят микроструктурные и фазовые превращения, возникают остаточные растягивающие напряжения [1, 2]. Все это приводит к значительному изменению механических, физико-химических и эксплуатационных свойств поверхностного слоя детали. Уменьшение теплонапряженности можно обеспечить применением кругов с прерывистой рабочей поверхностью. Прерывистое шлифование, по сравнению со сплошным, обладает рядом преимуществ: облегчение схода стружки, увеличение стойкости круга, сокращение количества правок, возможность сознательного регулирования теплонапряженности процесса обработки [1-3]. Однако периодическое прерывание процесса резания приводит к возникновению в упругой системе станка колебаний, которые при определенных условиях могут привести к резонансу, что неблагоприятно сказывается на

геометрических показателях качества поверхностного слоя обрабатываемой детали.

В работах, посвященных расчетам геометрических параметров прерывистых кругов, прослеживается преобладающее стремление обеспечить качество поверхностного слоя либо с позиции теплового фактора [1-4], либо с позиции динамического фактора [5, 6].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Последние публикации, посвященные прерывистому шлифованию [7, 8], не учитывают снижение качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей, вызванное возникновением в упругой системе станка параметрического резонанса.

**Формулировка цели статьи.** Целью работы является разработка методики расчета прерывистых кругов, позволяющей учитывать как тепловой, так и динамический факторы, оказывающие негативное влияние на качество поверхностного слоя шлифуемых деталей.

**Основная часть.** В работе [9] проанализирована возможность возникновения в упругой системе плоскошлифовального станка 3Г71 параметрического резонанса по причине периодического изменения ее жесткости в условиях обработки абразивными кругами с прерывистыми рабочими поверхностями. В работе [9] зоны параметрической неустойчивости рассчитаны и изображены в плоской системе координат  $\tau_l=f(Ko)$  (рис. 1), где  $\tau_l$  – время работы режущего выступа,  $n$  – количество впадин на шлифовальном круге,  $Ko$  – динамическая жесткость резания:

$$Ko = Co \times \left( \frac{tl}{t\phi} - 1 \right),$$

где  $Co$  – статистическая жесткость упругой системы станка, кг/м;

$tl, t\phi$  – глубина резания, установленная по лимбу станка, и фактическая глубина резания соответственно.

Зоны параметрического резонанса (рис. 1) можно представить в более удобном для практического применения виде (рис. 2), где  $Knp=l_2/l_1$  – коэффициент прерывистости, численно равный величине отношения протяженности впадины к длине режущего выступа.

Из рис. 2 видно, что с увеличением количества прорезей на шлифовальном круге прослеживается тенденция смещения областей параметрического резонанса в сторону больших значений динамической жесткости резания  $Ko$  и расширение границ этих областей по координате  $Knp$ .

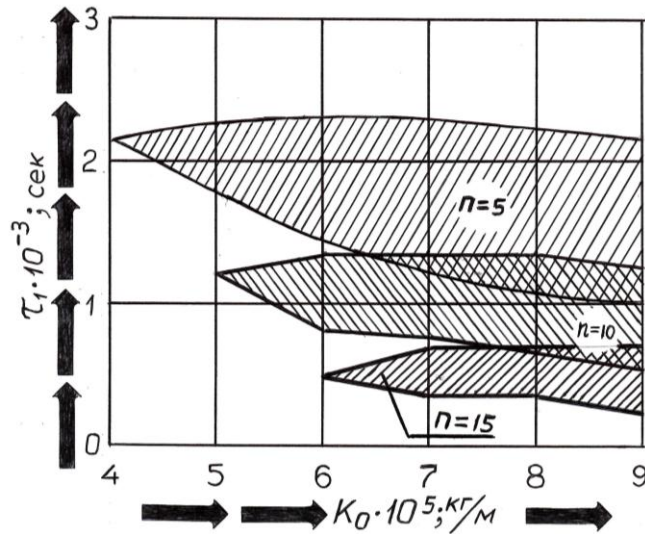


Рис. 1. Области неустойчивости (параметрического резонанса) упругой системы плоскошлифовального станка 3Г71 в плоской системе координат  $(K_0; \tau_1)$  [9]

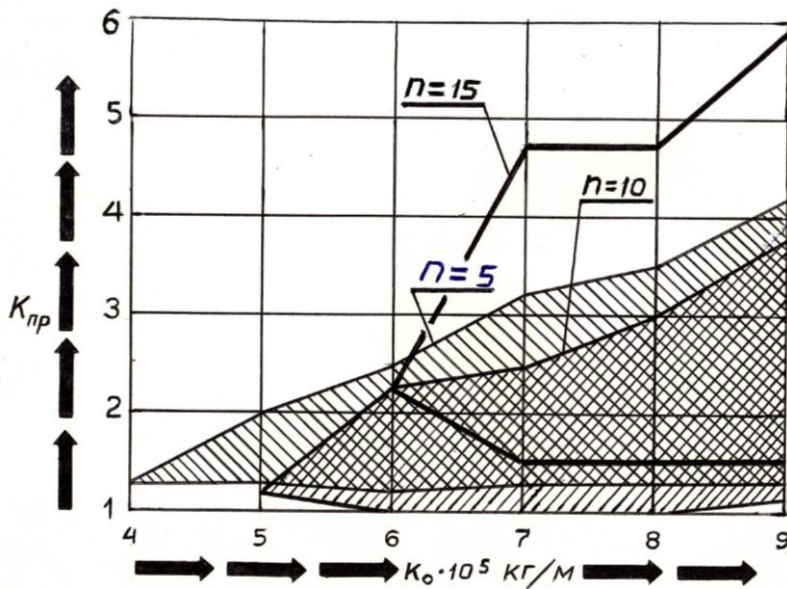


Рис. 2. Зоны параметрической неустойчивости упругой системы плоскошлифовального станка 3Г71 в плоской системе координат  $(K_0; K_{np})$

В результате наших исследований [10, 11, 12] появилась возможность расчетным путем выявлять и изображать зоны параметрической неустойчивости в системе координат  $K_{np}=f(n)$  (рис. 3, а). Для возможности сопоставления данных, приведенных на рис. 2, 3(а), области параметрического резонанса, изображенные в системе координат  $K_{np}=f(n)$ , представим в координатах  $K_{np}=f(K_0)$  (рис. 4).

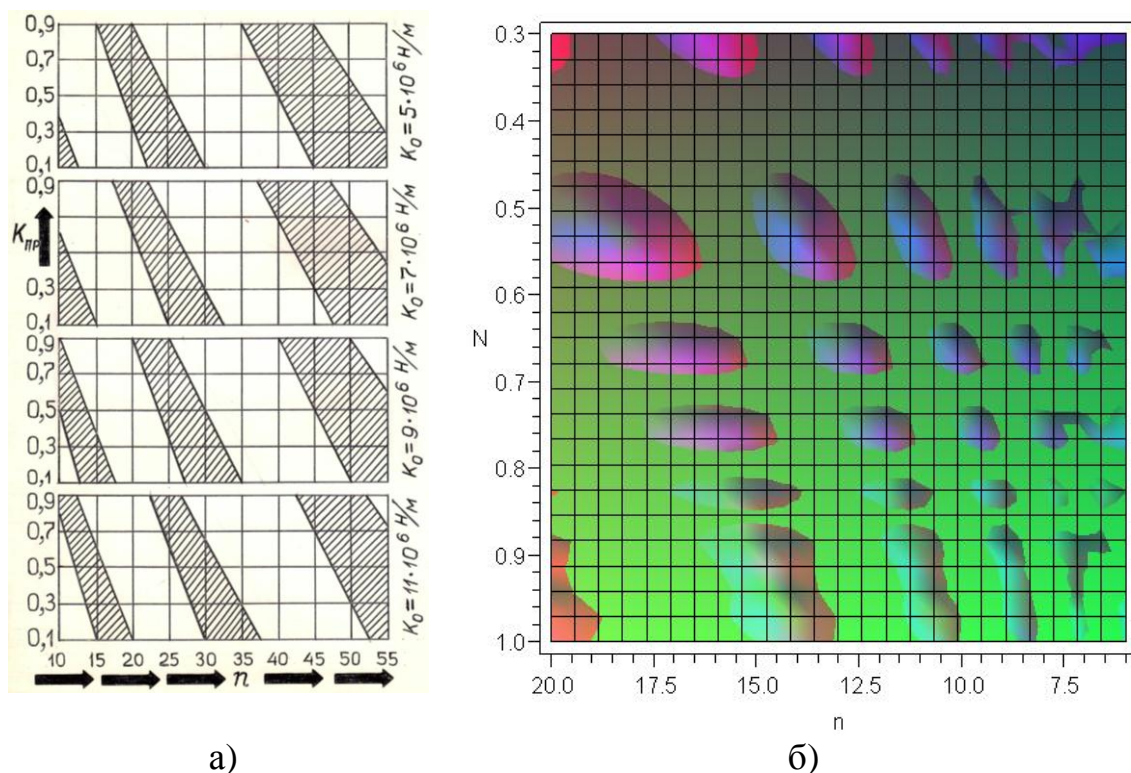


Рис. 3. Зоны параметрической неустойчивости упругих систем зубошлифовального станка MAAG SD 65 с нулевой настройкой кругов (а) и плоскошлифовального станка ЗГ71М для  $K_0=9 \cdot 10^5$  кг/м;  $0,3 \leq K_{np} \leq 1,0$ ;  $5 \leq n \leq 20$  (б)

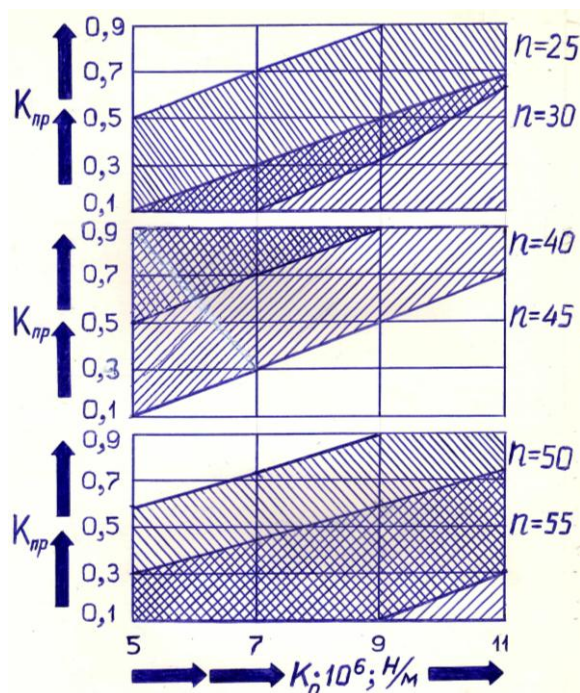


Рис. 4. Зоны параметрической неустойчивости упругих систем зубошлифовального станка MAAG SD 65 с нулевой настройкой кругов в плоской системе координат ( $K_0$ ;  $K_{np}$ )

На рис. 2 и рис. 4 прослеживается общая закономерность: при увеличении числа впадин на рабочей поверхности шлифовального круга наблюдается смещение областей параметрического резонанса в направлении бóльших значений динамической жесткости резания  $K_0$  с одновременным расширением границ этих областей по координате  $K_{пр}$ . Вместе с тем существует противоречивость между данными, представленными в работе [9] и результатами наших исследований. Из рис. 2 [9] следует, что в интервале чисел режущих выступов  $5 \leq n \leq 15$  параметрический резонанс возможен только в случаях, когда  $K_{пр} > 1$ , то есть когда протяженность впадины  $l_2$  превышает длину режущего выступа  $l_1$ . Согласно наших исследований в интервале изменения чисел режущих выступов  $5 \leq n \leq 15$  в упругой системе шлифовального станка может возникнуть параметрический резонанс при  $K_{пр} < 1$  (рис. 3, б).

На рис. 5 в плоской системе координат  $K_{пр} = f(n)$  изображены области параметрического резонанса (заштрихованные зоны), кривые 1,2,3,4,5, характеризующие геометрические параметры рабочих поверхностей прерывистых кругов с протяжностью впадин  $l_2 = 3, 4, 5, 6, 7$  мм соответственно и кривые 6,7,8,9, характеризующие снижение температур сплошного шлифования ( $\Theta = 800, 900, 1000, 1100$  °C соответственно). За счет применения прерывистых кругов до уровня, при котором на обрабатываемых поверхностях не происходят структурные и фазовые превращения.

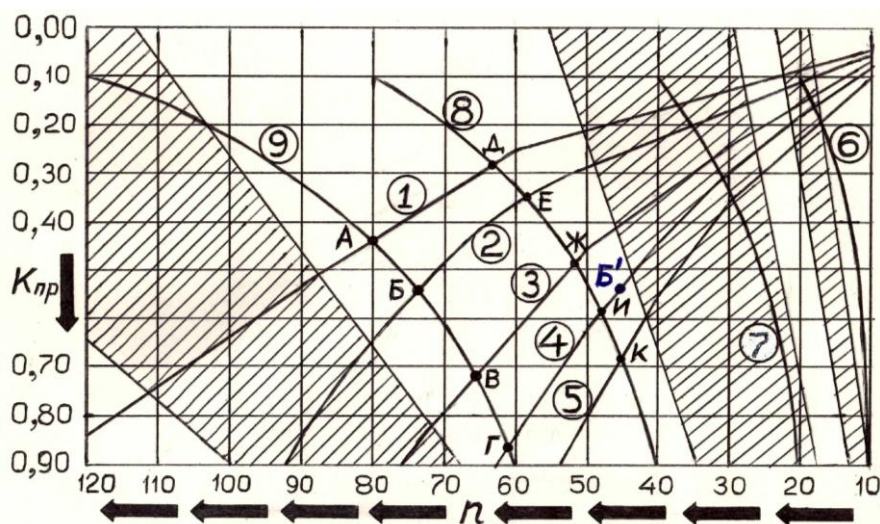


Рис. 5. Геометрические характеристики рабочей поверхности прерывистых шлифовальных кругов с размерами впадин 3 мм, 4 мм, 5 мм, 6 мм, 7 мм (кривые 1,2,3,4,5 соответственно) и их влияние на степень понижения температуры по сравнению со сплошным шлифованием (кривые 6,7,8,9) и на возможность предотвращения параметрического резонанса в упругой системе станка (заштрихованные области)

Данные, приведенные на рис. 5, рассчитаны для вполне конкретных условий шлифования в качестве примера.

Из рис. 5 видно, что при шлифовании прерывистыми кругами, имеющими на рабочих поверхностях 50 прорезей с интервалами изменения протяженностей впадины  $3 \leq l_2 \leq 7$  мм и коэффициента прерывистости  $0,2 \leq K_{np} \leq 0,9$ , обеспечивается устойчивая работа упругой системы станка. Для кругов с 60, 70, 80 прорезями на рабочих поверхностях и тем же диапазоном изменения значений коэффициента прерывистости ( $0,2 \leq K_{np} \leq 0,9$ ) интервалы протяженностей впадин, обеспечивающих устойчивую работу плоскошлифовального станка, соответственно равны  $3 \leq l_2 \leq 6$  мм,  $3 \leq l_2 \leq 5$  мм,  $3 \leq l_2 \leq 4$  мм. Прерывистые круги, имеющие на рабочей поверхности 25 впадин с протяженностью  $3 \leq l_2 \leq 7$  мм, обеспечивают безрезонансную работу шлифовального станка в интервале значений коэффициента прерывистости  $0,10 \leq K_{np} \leq 0,30$ .

Из рис. 5 (кривые 6,7,8,9) видно, что для обеспечения требуемой температуры в зоне резания необходимо при уменьшении коэффициента прерывистости увеличивать число режущих выступов на круге. Кроме того, с увеличением числа режущих выступов на абразивном инструменте при постоянном значении коэффициента прерывистости степень понижения температуры по сравнению со сплошным шлифованием возрастает.

Из рис. 5 видно, что области параметрической устойчивости упругой системы станка (незаштрихованные области) имеют вид полос, размеры которых расширяются в направлении уменьшения коэффициента прерывистости, а сами полосы наклонены в сторону увеличения количества впадин на прерывистом круге. Из этого следует, что для обеспечения безрезонансной работы плоскошлифовального станка необходимо при уменьшении коэффициента прерывистости увеличивать количество прорезей на рабочей поверхности абразивного инструмента. Технология изготовления прерывистых кругов сводится к прорезанию впадин на заточных станках, оснащенных делительными механизмами. Причем ширина впадины равна высоте круга, с помощью которого эти впадины прорезаются. При изготовлении кругов по этой технологии с увеличением количества прорезей неизбежно приводит к увеличению коэффициента прерывистости. Одновременное увеличение коэффициента прерывистости и числа прорезей способствует дополнительному снижению температуры в зоне резания. Увеличение числа впадин на прерывистом круге приводит к возрастанию себестоимости его изготовления.

Из рис. 5 видно, что температуру сплошного шлифования, равную 1100 °С, можно понизить до безопасного уровня за счет

применения прерывистых кругов, имеющих следующие совокупности геометрических характеристик рабочей поверхности:

- 1)  $n=60$ ,  $l_2=6$  мм (точка Г на линии 4);
- 2)  $n=65$ ,  $l_2=5$  мм (точка В на линии 3);
- 3)  $n=75$ ,  $l_2=4$  мм (точка Б на линии 2);
- 4)  $n=80$ ,  $l_2=3$  мм (точка А на линии 1).

Если температура сплошного шлифования равна 1000 °С, то обеспечить безопасную температуру в зоне резания можно за счет использования прерывистых кругов:

- 1)  $n=45$ ,  $l_2=7$  мм (точка К на линии 5);
- 2)  $n=48$ ,  $l_2=6$  мм (точка И на линии 4);
- 3)  $n=52$ ,  $l_2=5$  мм (точка Ж на линии 3);
- 4)  $n=58$ ,  $l_2=4$  мм (точка Е на линии 2);
- 5)  $n=63$ ,  $l_2=3$  мм (точка Д на линии 1).

В первом случае наиболее экономичным в изготовлении является круг, геометрические параметры которого соответствуют точке Г, а во втором случае – точке К. причем работа всех рассматриваемых девяти кругов не будет сопровождаться параметрическим резонансом. Удачному размещению кривых 8 и 9, соответствующих безопасным уровням температур, между двумя соседними зонами параметрической неустойчивости в значительной степени благоприятствует один и тот же угол наклона кривых и заштрихованных полос. Прерывистые круги, геометрические характеристики которых соответствуют точкам Д ( $n=65$ ;  $l_2=3$  мм;  $K_{np}=0,28$ ) и К ( $n=45$ ;  $l_2=7$  мм;  $K_{np}=0,69$ ), обеспечивают одну и ту же степень понижения температуры, но разную шероховатость поверхности и разные себестоимости изготовления инструментов.

Из рис. 2 и 4 видно, что динамическая жесткость резания  $K_0$  оказывает существенное влияние на параметрическую устойчивость упругой системы шлифовального станка. Численное значение  $K_0$  определяется режимами шлифования, состоянием рабочей поверхности шлифовального круга и обрабатываемостью материала.

Из рис. 6 видно, что при увеличении коэффициента прерывистости шероховатость поверхности возрастает, а при увеличении числа впадин на круге – снижается.

Из рис. 5 видно, что шлифовальный круг, соответствующий точке К, имеет меньшее количество впадин и больший коэффициент прерывистости по сравнению с кругом, соответствующим точке Д. Из этого следует, что при шлифовании кругом «К» шероховатость обработанной поверхности будет значительно выше, чем при шлифовании кругом «Д». Но при этом круг «К» более экономичен в изготовлении.

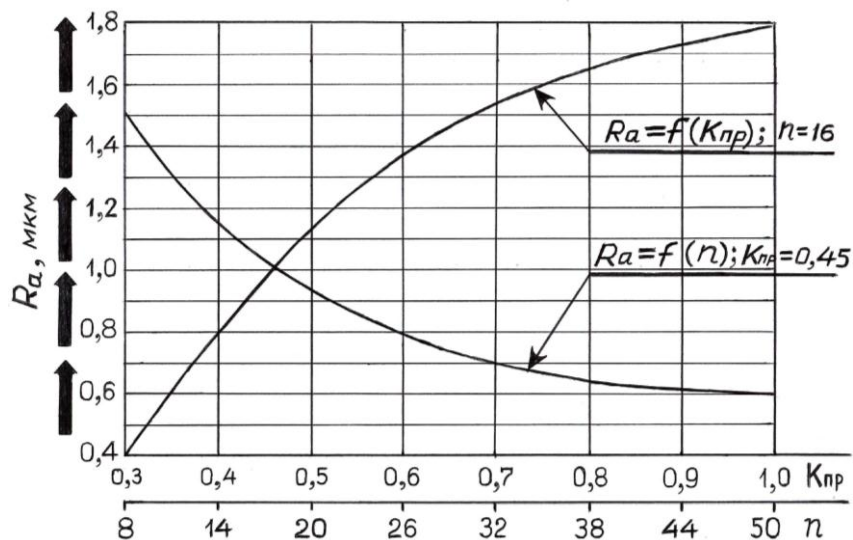


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности от количества прорезей  $n$  на рабочей поверхности прерывистого круга и от коэффициента прерывистости  $K_{np}$  [11]

На рис. 7 показаны зависимости относительного расхода  $q$  алмазного прерывистого круга от количества режущих выступов  $n$ . Эти зависимости носят экстремальный характер. С увеличением жесткости шпиндельного узла  $C_0$  минимум  $q$  уменьшается и смещается в область больших значений  $n$ .

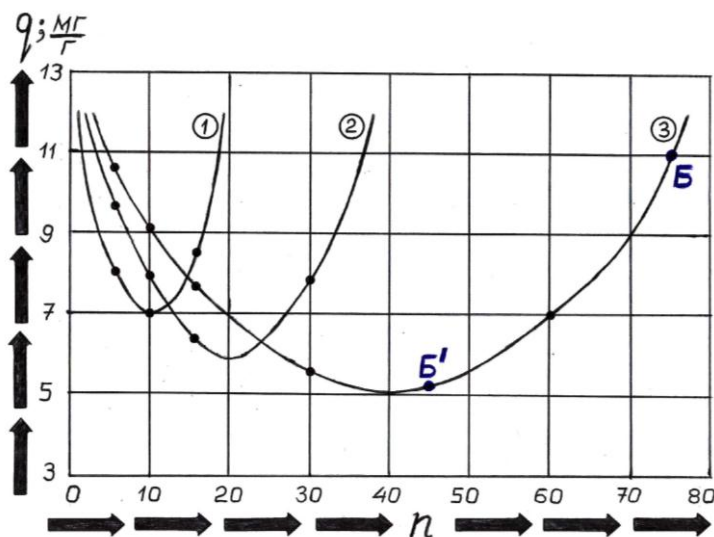


Рис. 7. Зависимости относительного расхода  $q$  алмазного прерывистого круга от количества режущих выступов  $n$ , построенные для  $K_{np}=0,55$  и для различных значений жесткости  $C_0$ : 1 -  $C_0=0,5 \cdot 10^6$  н/м; 2 -  $C_0=2,0 \cdot 10^6$  н/м; 3 -  $C_0=3,5 \cdot 10^6$  н/м [12]

Из сопоставления рис. 5 и 7 видно, что при  $K_{np}=0,55$ ;  $C_0=3,5 \cdot 10^6$  н/м и при увеличении количества прорезей на рабочих поверхностях кругов от  $n=45$  (точка Б') до  $n=75$  (точка Б)



относительный расход алмазного слоя  $q$  возрастает от 5 мг/г до 11 мг/г, степень понижения температуры прерывистого шлифования, по сравнению со сплошным, возрастает, а себестоимость изготовления кругов увеличивается.

Проведенный анализ показал сложность обеспечения минимальной себестоимости изготовления прерывистых инструментов и требуемых геометрических и физико-механических параметров качества поверхностного слоя деталей при шлифовании прерывистыми кругами с прямыми вырезами на рабочих поверхностях. В работах [13-16] предлагается обеспечивать требуемое качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей за счет применения прерывистых кругов с равномерным контактом, рабочие поверхности которых имеют наклонные пазы (рис. 8) или выглядят в виде непрерывной волнообразной ленты (рис. 9).



Рис. 8. Внешний вид абразивного (а) и алмазного (б) прерывистых кругов с наклонными впадинами, обеспечивающими непрерывный контакт инструмента с обрабатываемым материалом

Наличие постоянного контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью исключает возможность возникновения в упругой системе станка параметрического резонанса. Поскольку при шлифовании такими кругами не возникает параметрический резонанс, то расчет геометрических элементов их рабочих поверхностей можно свести только к расчету протяженности режущего выступа.

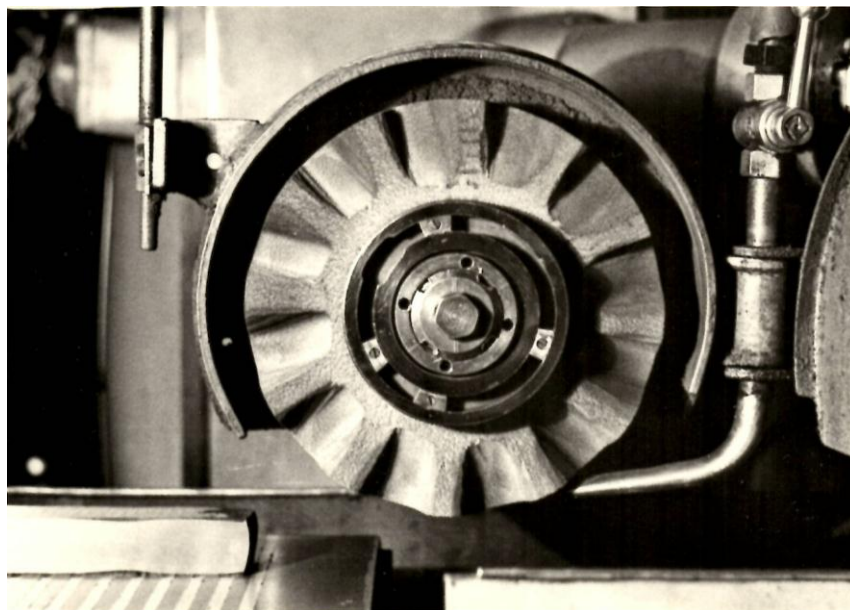


Рис. 9. Внешний вид абразивного круга с рабочей поверхностью в виде непрерывной волнообразной ленты, обеспечивающей постоянный контакт с обрабатываемой деталью

Методика расчета параметров прерывистого круга, обеспечивающего равномерный контакт с обрабатываемым материалом, по температурному критерию [16]:

1. Задаваясь предельно допустимой температурой в зоне резания, например, температурой третьего периода отпуска  $\Theta = 400\text{--}450\text{ }^\circ\text{C}$ , определяется безразмерная температура по формуле:

$$\Theta^\chi = \frac{\pi \times V_d \times \Theta \times K_{np}}{2 \times q' \times \alpha},$$

где  $V_d$  – скорость детали, м/с;

$\alpha$  – температуропроводность обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с;

$q'$  – плотность теплового потока, Дж/(м<sup>2</sup>·с).

2. Из таблицы 1 определяется безразмерный комплекс

$$\chi = \frac{V_d^2 \times \tau}{4 \times \alpha}.$$

Таблица 1

Числовые значения безразмерного комплекса  $\chi$

|               |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\chi$        | 0,02   | 0,05   | 0,10   | 0,15   | 0,20   | 0,25   | 0,30   | 0,35   |
| $\Theta^\chi$ | 0,2316 | 0,3495 | 0,4784 | 0,5599 | 0,6230 | 0,6720 | 0,7140 | 0,7470 |
| $\chi$        | 0,40   | 0,45   | 0,50   | 0,55   | 0,60   | 0,65   | 0,70   | 0,80   |
| $\Theta^\chi$ | 0,7760 | 0,8130 | 0,823  | 0,841  | 0,857  | 0,870  | 0,881  | 0,899  |
| $\chi$        | 0,85   | 0,90   | 0,95   | 1,00   | 1,10   | 1,20   | 1,30   | 1,40   |
| $\Theta^\chi$ | 0,906  | 0,911  | 0,917  | 0,919  | 0,923  | 0,9232 | 0,924  | 0,9241 |

3. Определяется время работы режущего выступа:

$$\tau = \frac{4 \times \alpha}{V_{\text{д}}^2}.$$

4. Определяется длина режущего выступа:

$$l_1 = \pi \times D_{\text{кр}} \times n' \times \tau,$$

где  $n'$  – частота вращения круга в секунду;

$D_{\text{кр}}$  – диаметр круга, м.

**Выводы.** 1. Показано влияние геометрических параметров прерывистых кругов с прямыми пазами на их относительный износ, температуру в зоне резания и параметрическую устойчивость упругой системы при обработке на плоско- и зубошлифовальных станках моделей 3Г71М и MAAG SD 65 соответственно.

2. С целью обеспечения геометрических показателей качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей обоснована возможность применения прерывистых шлифовальных кругов с наклонными пазами и предложена методика расчета размеров геометрических элементов, входящих в состав их рабочей поверхности.

### *Литература*

1. Сипайлов В.А. Расчет размеров режущих перемычек круга при прерывистом шлифовании / В.А. Сипайлов, А.В. Якимов // Заводская лаб. – Пермь, 1966. – Т.32. – №7. – С. 847–851.
2. Якимов А.В. Методика расчетов кругов с прерывистой рабочей поверхностью / А.В. Якимов, Н.А. Ярмонов, Ю.А. Напарьин // Вестник машиностроения. – Москва, 1973. – №12. – С. 38–41.
3. Якимов А.В. Расчет геометрических параметров прерывистых кругов / А.В. Якимов, Ю.А. Напарьин, Н.А. Ярмонов, В.И. Свирщёв, Е.В. Грисенко // Информационный листок Западно-Уральского МТЦНТИиП. – № 259-74. – Пермь, 1974. – 7 с.
4. Якимов А.В. Расчет, конструирование и эффективность применения прерывистых кругов - вентиляторов / А.В. Якимов, В.В. Якимов, В.Н. Кудашкин // Новые методы абразивной обработки. – Киев: Вища школа, 1975. – С. 85–91.
5. Лукин Л.Л. Расчет прерывистых алмазных кругов при плоском периферийном шлифовании / Л.Л.Лукин, В.Д. Старшев // Вестник Иж.ГТУ. – 2007. – №1. – С. 34–38.
6. Свирщёв В.И. К вопросу расчета параметров регулярного макрорельефа на рабочей поверхности абразивного инструмента / В.И. Свирщёв // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении:

- Межвузовский сбор. научн. трудов. – Пермь: ППИ, 1990. – С. 41–48.
7. Лищенко Н.В. Определение температуры при шлифовании прерывистыми и высокопористыми кругами / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за напрямком «Інженерна механіка»). – Луцьк: ЛДТУ, 2013. – Вип. 40. – С. 150–158.
  8. Лищенко Н.В. Определение температуры прерывистого шлифования / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.В. Якимов // Праці Одеського політехнічного університету: науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса, 2012. – Вип. 2 (39). – С. 80–85.
  9. Свирщёв В.И. Об устойчивости упругой системы плоскошлифовального станка ЗГ71 / В.И. Свирщёв, А.Н. Паршаков, В.И. Потёмкин // Повышение качества деталей при окончательных метода обработки: Межвузовский сбор. научн. трудов. – Пермь: Персмк. полит. институт, 1977. – Вып. 208. – С. 41–48.
  10. Якимов О.О. До питання про знос шліфувальних кругів з переривчастою робочою поверхнею / О.О. Якимов, Н.М. Клименко, Ю.В. Шіхірева, С.Ю. Дмитрієва, С.М. Уминський // Аграрний вісник Причорномор'я: збірн. наук. праць. (Технічні науки). – Одеса: ОДАУ, 2016. – Вип. 80. – С. 13–23.
  11. Якимов О.О. Вплив конструкції переривчастого шліфувального круга на геометричні показники якості оброблюваної поверхні / О.О. Якимов // Резание и инструмент в технологических системах: междун. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. – Вып. 85. – С. 323–330.
  12. Якимов А.В. Теоретические основы резания и шлифования материалов / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.
  13. Амбарян Р.С. Прерывистый абразивный круг с равномерным контактом обработки / Р.С. Амбарян // Промышленность Армении: сбор. науч. тр. – 1970. – №10. – С. 20–25.
  14. Амбарян Р.С. Новая геометрия рабочего профиля шлифовального круга / Р.С. Амбарян // Промышленность Армении: сбор. науч. тр. – 1971. – №4. – С. 32–36.
  15. Амбарян Р.С. Исследование процесса шлифования прерывистыми кругами с равномерным контактом: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05-171 / Р.С. Амбарян. – Ереван, 1972. – №10. – 26 с.
  16. Якимов А.В. Оптимизация параметров процесса шлифования прерывистыми кругами с равномерным контактом / А.В. Якимов, А.А. Якимов, С.Ю. Дмитриева // Вісник Харківського нац. техніч.

університету сільськ. Господарства ім. Петра Василенка: збірн. наук. праць. – Харьков: ХНТУСГ, 2007. – Вип. 61. – С. 34–39.

## **МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ПЕРЕРИВЧАСТИХ ШЛІФУВАЛЬНИХ КІЛ**

Якімов О.О., Бовнегра Л.В., Безнос С.В., Дмитрієва С.Ю.,  
Добровольський В.В.

*В роботі розглядається вплив геометричних параметрів переривчастих кіл з прямими пазами на їх відносне знос, температуру в зоні різання і параметричну стійкість пружної систем, а також, з метою забезпечення геометричних показників якості поверхневого шару оброблюваних деталей, обґрунтована можливість застосування переривчастих шліфувальних кругів з похилими пазами і запропонована методика розрахунку розмірів геометричних елементів.*

*Ключові слова: область параметричного резонансу, динамічна жорсткість різання, переривчасте коло.*

## **MODELING OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THE WORKING SURFACES OF THE DISCONTINUOUS GRINDING WHEELS**

Yakimov O., Bovnegra L., Beznos S., Dmytriieva S.,  
Dobrovolskyi V.

*The influence of the geometric parameters of discontinuous circles with straight grooves on their relative wear, the temperature in the cutting zone and the parametric stability of the elastic system is examined, and also the possibility of using discontinuous grinding wheels with inclined grooves and a method for calculating the dimensions of geometric elements is proposed.*

*Key words: parametric resonance region, dynamic rigidity of cutting, intermittent circle.*