

УДК621.92.01

А.А. Якимов, д-р техн. наук, Л.В. Бовнегра, канд. техн. наук,  
В.П. Кулик, Одесса, Украина

**ВЫБОР ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКРОРЕЛЬЕФА РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, ПРИСУЩИХ ПРЕРЫВИСТОМУ ШЛИФОВАНИЮ**

*Виявлено шляхи зниження ймовірності виникнення параметричного резонансу в пружній системі верстата за рахунок збільшення кількості прорізів на робочій поверхні переривчастого шліфувального круга. Обґрунтовано доцільність заміни переривчастих кругів з великим числом прорізів на кругі, робоча поверхня яких має насічку у вигляді невеликих лунок, що нагадують штучні пори шліфувального круга.*

*Виявлені пути снижения вероятности возникновения параметрического резонанса в упругой системе станка за счет увеличения количества прорезей на рабочей поверхности прерывистого шлифовального круга. Обоснована целесообразность замены прерывистых кругов с большим числом прорезей на круги, рабочая поверхность которых имеет насечку в виде небольших лунок, напоминающих искусственные поры шлифовального круга.*

*Identified ways to reduce the probability of occurrence of parametric resonance in the elastic system of the machine by increasing the number of slots on the working surface of the grinding wheel intermittent. The expediency of replacing the broken circle with a large number of slots on a circle, the working surface having a notch in the form of small holes that resemble artificial pores of the grinding wheel.*

**Постановка проблеми.** Абразивные прерывистые круги используются в промышленности для снижения температуры при шлифовании, что позволяет избежать нежелательные фазово-структурные изменения поверхностного слоя обрабатываемой детали. Основной недостаток кругов с прерывистой рабочей поверхностью – колебания, возникающие из-за прерываемости процесса резания, амплитуды которых могут достигать значений, не позволяющих обеспечивать качественные показатели обработанных поверхностей. Шлифование кругами с прерывистой рабочей поверхностью сопровождается чередованием замкнутых и незамкнутых состояний динамической системы, что приводит к периодическому изменению ее жесткости, а при определенном сочетании длин выступов и впадин – к параметрическому резонансу. Существующие методики расчета длин выступов и впадин прерывистых абразивных кругов разработаны в основном с позиции обеспечения требуемой степени понижения температуры в зоне резания и не учитывают динамические явления, присущие прерывистому шлифованию.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам возникновения параметрического резонанса в условиях прерываемости процесса резания посвящены работы [1-7]. Вопросы возникновения параметрического резонанса в условиях шлифования абразивными прерывистыми кругами в современной технической литературе не получили достаточного освещения.

Цель работы – выявить геометрические параметры макрорельефа рабочей поверхности прерывистого круга, расчеты которых при проектировании абразивного инструмента позволят обеспечить не только требуемую степень понижения температуры в зоне резания, но и безрезонансную работу упругой системы станка.

Изложение основного материала. В работе [8] получено условие неустойчивости упругой системы шлифовального станка

$$|L| > \frac{1+M}{2} \quad (1)$$

где

$$L = \frac{e^{-h(\tau_1+\tau_2)}}{h(k_2 + h \sin 2k_2\tau_1)} \left[ k_1^2 \sin k_1\tau_1 \sin k_2\tau_2 - \right. \\ \left. - 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \cos k_2\tau_1 \cdot \cos k_1\tau_1 \cdot \cos k_2(\tau_1 + \tau_2) - \right. \\ \left. - k_2^2 \sin k_1\tau_1 \sin(2 \cdot k_2\tau_1 + k_2\tau_2) \right], \quad (2)$$

$$M = \frac{k_1 k_2 e^{-2h(\tau_1+\tau_2)} \cos[2(k_2(\tau_1 + \tau_2))]}{h(k_2 + h \sin 2k_2\tau_1)}, \quad (3)$$

$$\tau_1 = \frac{l_1}{V_{kp}}; \tau_2 = \frac{l_2}{V_{kp}}; l_1 = \frac{\pi \cdot D_{kp}}{n \cdot (1 + N)}; l_2 = \frac{\pi \cdot D_{kp}}{n \cdot \left(1 + \frac{1}{N}\right)}; N = \frac{l_2}{l_1},$$

$l_1$  – длина выступа;  $l_2$  – ширина впадины;  $n$  – количество режущих выступов на шлифовальном круге;  $D_{kp}$  – диаметр круга;  $V_{kp}$  – скорость круга.

$$k_1 = \sqrt{\frac{C_o}{m} + \frac{C_o \cdot \left(\frac{t_\lambda}{t_\phi} - 1\right)}{2}} \cdot \frac{1}{m} - h^2; \quad k_2 = \sqrt{\frac{C_o}{m} - \frac{C_o \cdot \left(\frac{t_\lambda}{t_\phi} - 1\right)}{2}} \cdot \frac{1}{m} - h^2.$$

$m$  – приведенная масса,  $\frac{H \cdot \text{сек}^2}{m}$ ;  $h$  – жесткость системы;

$C_0$  – величина, характеризующая затухание колебаний во времени,  $\frac{1}{сек}$ .

$$K_0 = C_0 \cdot \left( \frac{t_{\text{л}}}{t_{\text{ф}}} - 1 \right) \text{ — жесткость резания; } \frac{H}{M}.$$

На рис. 1 показаны графические зависимости  $L = f(n; N)$  и  $\frac{1+M}{2} = f(n; N)$ , которые выглядят в виде волнообразной и плоской поверхностей соответственно. Если участки волнообразной поверхности выступают над плоской поверхностью, то это означает, что соблюдается условие неустойчивости (1), а линии пересечения этих поверхностей представляют собой границы областей неустойчивости. На рис. 1 (справа) показаны эти области на виде слева.

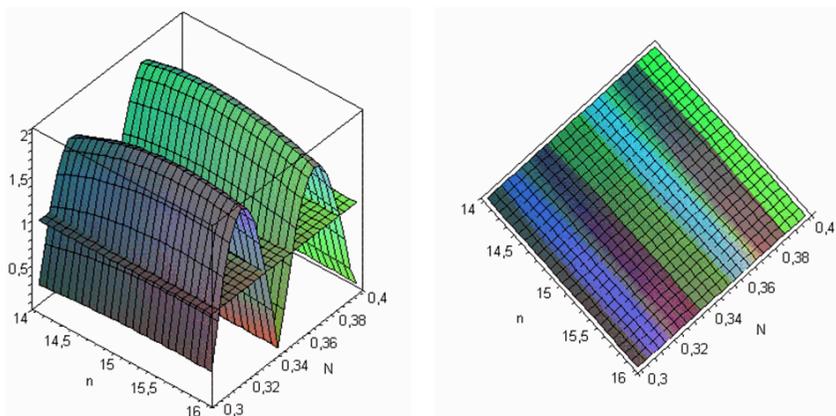


Рисунок 1 – Геометрическое представление условия неустойчивости.  $|L| > \frac{1+M}{2}$

На рис. 2 показана экспериментальная зависимость жесткости резания  $K_0$  от числа режущих выступов на прерывистом шлифовальном круге.

На рис. 3 и рис. 4 (внизу) показаны области неустойчивой работы упругой системы станка в диапазоне изменения числа режущих выступов  $5 \leq n \leq 25$  с учетом смены жесткости резания в диапазоне  $2 \cdot 10^6 \text{ н/м} \leq K_0 \leq 8 \cdot 10^6 \text{ н/м}$  (согласно рис. 2).

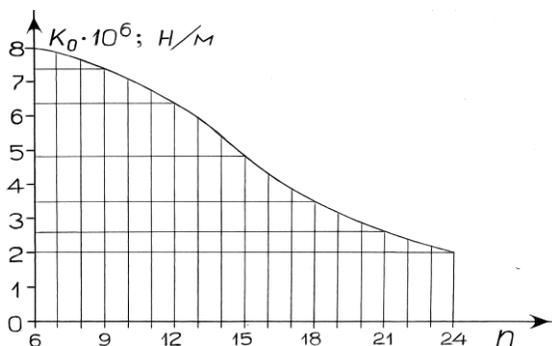


Рисунок 2 – Характер изменения жесткости резания  $K_0$  при увеличении числа выступов  $n$  на прерывистом круге

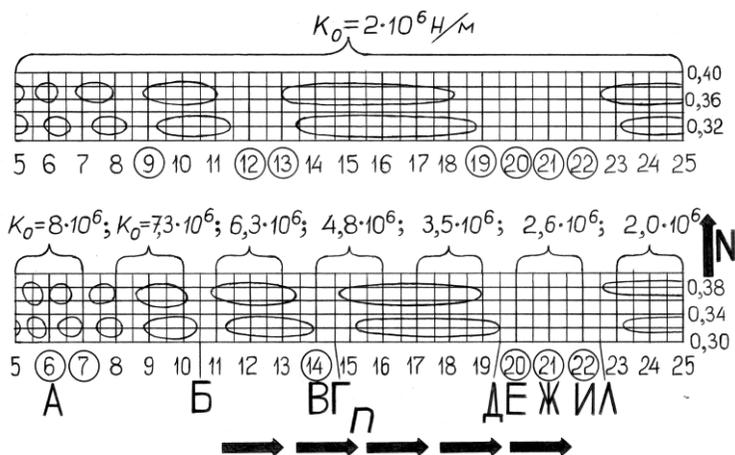


Рисунок 3 – Области неустойчивой работы упругой системы станка с учетом (внизу) и без учета (вверху) изменения жесткости резания

$K_0 = 2,0 \cdot 10^6$  н/м при изменении количества выступов на шлифовальном круге

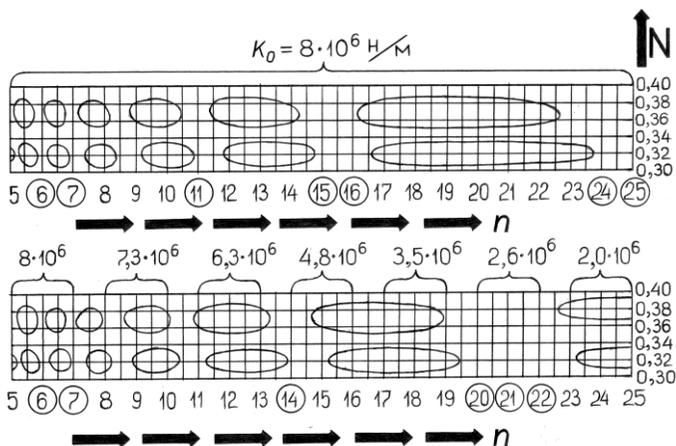


Рисунок 4 – Области неустойчивой работы упругой системы станка с учетом (внизу) и без учета (вверху) изменения жесткости резания  $K_0 = 8 \cdot 10^6$  н/м при изменении количества режущих выступов на шлифовальном круге

На рис. 3 и рис. 4 числа режущих выступов, при которых в упругой системе станка не возникает параметрический резонанс, выделены кружками.

Из рис. 3 и рис. 4 видно, что с уменьшением числа режущих выступов на шлифовальном круге сужаются как области параметрической неустойчивости, так и безрезонансные зоны.

Из сопоставления верхних частей рис. 3 и 4 видно, что увеличение жесткости резания  $K_0$  приводит к расширению резонансных зон и смещению их в направлении увеличения числа режущих выступов  $n$  на шлифовальном круге.

Из рис. 3 и рис. 4 также видно, что игнорирование зависимости  $K_0 = f(n)$  недопустимо при расчете и выборе геометрических параметров прерывистых кругов.

Расчеты областей неустойчивой работы упругой системы станка приведенные для  $K_0 = 2,0 \cdot 10^6$  н/м;  $K_0 = 5,0 \cdot 10^6$  н/м;  $K_0 = 8,0 \cdot 10^6$  н/м;  $C_0 = 7 \cdot 10^6$  н/м;  $0,30 \leq N \leq 0,40$ ;  $5 \leq n \leq 25$ , позволили выявить такие совокупности значений жесткостей резания  $K_0$  и чисел режущих выступов  $n$  на шлифовальном круге, при которых обеспечивается устойчивая работа упругой системы станка. Эти данные представлены на рис. 5.

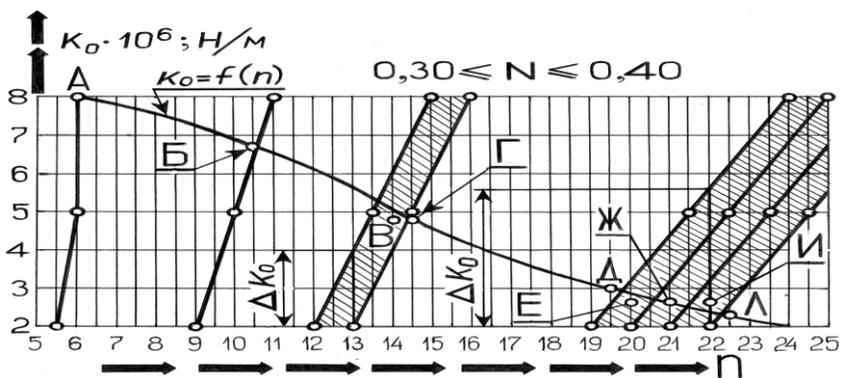


Рисунок 5 – Совокупности чисел режущих выступов и значений жесткостей резания, при которых обеспечивается устойчивая работа

Точки А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, И, Л, расположенные на кривой  $K_0 = f(n)$  или недалеко от этой кривой, получены расчетным путем и характеризуют совокупности  $K_0$  и  $n$ , при которых невозможен параметрический резонанс.

Жесткость резания  $K_0$  зависит не только от числа режущих выступов на шлифовальном круге, но и от параметров режима резания, а также от продолжительности обработки. Шлифование осуществляется, как правило, за несколько проходов, каждый из которых имеет свою глубину резания. Смена глубины резания приводит к изменению жесткости резания  $K_0$ , что в свою очередь требует замены прерывистого шлифовального круга на новый круг – с другим числом режущих выступов, что на практике реализовать невозможно. Поэтому для того чтобы при изменении условий обработки не нужно было менять абразивный прерывистый инструмент на новый, необходимо иметь как можно больший интервал допустимых значений жесткости резания  $\Delta K_0$ .

Из рис. 5 видно, что с увеличением числа режущих выступов на абразивном круге происходит расширение зон безрезонансной работы упругой системы шлифовального станка, т.е. происходит расширение интервала допустимых значений жесткости резания  $\Delta K_0$ .

На рис. 6 показана область устойчивой работы упругой системы шлифовального станка в виде наклонной четырехгранной призмы, построенной в системе координат с осями  $n$ ,  $N$ ,  $K_0$ .

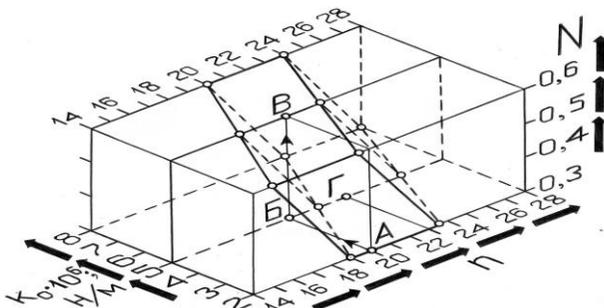


Рисунок 6. – Область устойчивой работы упругой системы станка, построенная в координатах  $n$ ,  $N$ ,  $K_0$  для  $C_0 = 7 \cdot 10^6$  н/м

Из рис. 6 видно, что при шлифовании кругом с числом режущих выступов  $n=20$  и коэффициентом прерывистости  $N=0,3$  на режиме шлифования, обеспечивающем жесткость резания  $K_0 = 2,0 \cdot 10^6$  н/м, параметрический резонанс не возникает (точка А). При увеличении жесткости резания до  $K_0 = 5,0 \cdot 10^6$  н/м (например, по причине засаливаемости рабочей поверхности абразивного инструмента) в упругой системе шлифовального станка возникает параметрический резонанс (точка В), который можно прекратить увеличением размеров впадин при сохранении их количества  $n$  на шлифовальном круге (т.е. увеличением значения коэффициента прерывистости  $N$ ) (точка В) или увеличением числа впадин  $n$  при сохранении величины отношения их длин к длинам режущих выступов (точка Г). Выйти из режима параметрического резонанса можно за счет увеличения скорости вращения шлифовального круга (рис. 7).

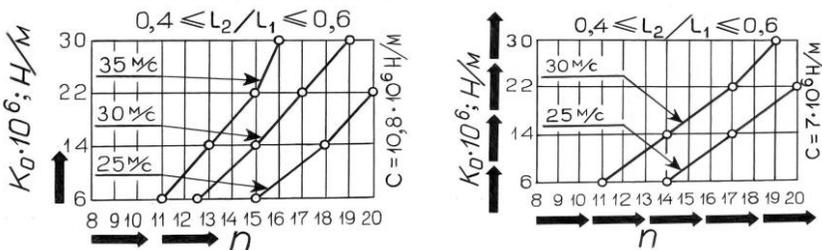


Рисунок 7 – Совокупности чисел режущих выступов  $n$  и жесткости резания  $K_0$ , обеспечивающих безрезонансную работу при разных значениях приведенной жесткости упругой системы шлифовального станка

**Вывод.** Установлено, что увеличение количества режущих выступов на абразивных кругах с прерывистой рабочей поверхностью приводит к расширению интервала допустимых значений  $\Delta K_0$  жесткости резания, при которых обеспечивается безрезонансная работа упругой системы шлифовального станка. Выявленная закономерность позволяет сделать предположение, что шлифовальные круги, рабочая поверхность которых состоит из выступов и впадин, целесообразно заменить на круги, рабочая поверхность которых имеет насечку [9, 10]. Насеченный круг получают на базе сплошного круга путем выкалывания на его рабочей поверхности небольших лунок, напоминающих искусственные поры, как у высокопористых кругов. Эти лунки одновременно способствуют разрыву процесса шлифования, напоминая впадины прерывистого круга.

**Список использованной литературы:** 1. *Оргиян А.А.* Колебания и устойчивость упругих систем обточных, копировальных станков//Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. НТУ «ХПІ». – 2000. – Вип. 1(3). – С.184-190. 2. *Оргиян А.А.* Условие параметрической неустойчивости замкнутой динамической системы расточного станка//Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2006. – Вып.70. – С.362-369. 3. *Оргиян О.А., Бажанов О.І., Бензар А.М.* Параметричні коливання при механічній обробці деталей//Физические и компьютерные технологии. – Труды 15-й Международной научно-технической конференции, 2-3 декабря 2009 г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2009. – С.40-46. 4. *Оргиян О.А., Бажанов О.І., Бензар А.М.* Обробка переривчастих поверхонь на розточувальних верстатах //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім.Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2009. – Вип.81 – С.253-257. 5. *Линчевский П.А., Джугурян Т.Г., Оргиян А.А.* Обработка деталей на отделочно-расточных станках. – К.: Техника. – 2001. – 300с. 6. *Линчевский П.А., Оргиян А.А., Онищенко С.М.* Тонкое растачивание отверстий с прерывистой поверхностью // Физические и компьютерные технологии. – Труды 11-й Международной научно-технической конференции, 2-3 июня 2005 г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2005. – С.48-52. 7. *Оргиян, А.А.* Влияние переменности припуска на параметрическую устойчивость процесса тонкого растачивания /А.А. Оргиян, А.В. Баланюк, И.М. Теорищук // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. – 2015. – Вип.3(8) – С.98-103. 8. *Усов, А.В.* Параметрические резонансы, возникающие при кусочно-постоянном возбуждении упругой системы шлифовального станка /А.В. Усов, А.А. Якимов // Праці Одеськ. нац. політехн. ун-ту: Наук. та наук.- вироб. зб. – Одеса: ОНПУ, 2014.– Вип.1 (43). – С.60-68. 9. А.С. № 1484652 (СССР). Устройство для правки шлифовального круга / В.И. Свирицев, Л.Ю. Ковалев. Заявл. 28.09.87. № 4311657/31–08. Оpubл. В Б.И., 1989, № 21 10. А.С. № 1493447 (СССР). Способ шлифовального круга / В.И. Свирицев, Л.Ю. Ковалев. Заявл. 04.01.87. №174603/31–08. Оpubл. В Б.И., 1989, № 26.

**Bibliography (transliterated):** 1.Orgijan A.A. Kolebanija i ustojchivost' uprugih sistem obtochnyh, kopiroval'nyh stankov//Visoki tehnologiji v mashinobuduvanni: Zb. nauk. pr. NTU «HPI». - 2000. - Vip. 1(3). - S.184-190. 2.Orgijan A.A. Uslovie parametricheskoj neustojchivosti zamknoj dinamicheskoj sistemy rastrochnogo stanka//Rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. - Har'kov, NTU «HPI», 2006. - Vyp.70. - S.362-369. 3.Orgijan O.A., Bazhanov O.I., Benzar A.M. Parametrichni kolivannja pri mehanichnij obrobci detalej//Fizicheskie i komp'juternje tehnologiji. - Trudy 15-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskij konferencii, 2-3 dekabrja 2009 g. - Har'kov: HNPК «FJeD», 2009. - S.40-46. 4.Orgijan O.A., Bazhanov O.I., Benzar A.M. Obrobka pererivchastih poverhon' na roztochuval'nih verstatah //Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu sil's'kogo gospodarstva im..Petra Vasilenka. - Harkiv: HNTUSG, 2009. - Vip.81 - S.253-257.

5.Linchevskij P.A., Dzhugurjan T.G., Orgijan A.A. Obrabotka detalej na otdelochno-rastochnyh stankah. - K.: Tehnika. - 2001. - 300s. 6.Linchevskij P.A., Orgijan A.A., Onishhenko S.M. Tonkoe rastachivanie otverstij s preryvistoj poverhnost'ju//Fizicheskie i komp'juternye tehnologii. - Trudy 11-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, 2-3 ijunja 2005 g. - Har'kov: HNPК «FJeD», 2005. - S.48-52. 7. Orgijan, A.A. Vlijanie peremennosti pripuska na parametriceskiju ustojchivost' processa tonkogorastachivaniya /A.A. orgijan, A.V. Balanjuk, I.M. tvorishhuk//Informacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobnictvi. - 2015. - Vip.3(8)- S.98-103. 8.Usov, A.V. Parametriceskie rezonansy, voznikajushhie pri kusochno-postojannom vobzuzhdenii uprugoj sistemy shlifoval'nogo stanka /A.V. Usov, A.A. Jakimov//Praci Odes'k. nac. politehn. un-tu: Nauk. ta nauk.- virob. zb. - Odesa: ONPU, 2014.- Vip.1 (43). - S.60-68. 9. A.S. № 1484652 (SSSR). Ustrojstvo dlja pravki shlifoval'nogo kruga /V.I. Svirshhev, L.Ju. Kovalev. Zajavl. 28.09.87. № 4311657/3-08. Opubl. V B.I., 1989, № 21 10. A.S. № 1493447 (SSSR). Sposob pravki shlifoval'nogo kruga /V.I. Svirshhev, L.Ju. Kovalev. Zajavl. 04.01.87. №174603/31-08. Opubl. V B.I., 1989, № 26

*Поступила в редколлегию 30.07.2015*