

ОСОБЕННОСТИ ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ

В статье теоретически выявлено влияние размеров элементов режущего макрорельефа рабочей поверхности прерывистого шлифовального круга на теплонапряженность процесса шлифования и на появление в упругой системе станка ударных и параметрических резонансов. Экспериментальным путем установлено, что увеличение числа режущих выступов на прерывистом шлифовальном круге благотворно влияет на процесс самообразования его режущего микрорельефа, т.е. на процесс самозатачивания режущих зерен. Сформулированы рекомендации по выбору геометрических показателей режущего макрорельефа рабочей поверхности прерывистого абразивного инструмента, обеспечивающих требуемые геометрические и физико-механические параметры качества обрабатываемых поверхностей ответственных деталей машин.

Ключевые слова: режущие выступы, самозатачивание, режущий макрорельеф, параметрический резонанс, теплонапряженность процесса шлифования

A.A. JAKIMOV, L.V. BOVNEGRA
Odessa national polytechnic university

THE FEATURES OF FALTERING GRINDING

Abstract – in this article it is theoretically revealed that the size of elements of the cutting macror relief of faltering grinding wheel's working surface influences on the thermal stress of grinding process and the emergence of the parametrical and shock resonances in the elastic system of the machine. It is experimentally determined that the increase of number of faltering grinding wheel's cutting ledges has a good influence on its cutting microrelief self-creation process, that is the process of self-sharpening of the cutting grains. The recommendations are formulated helping to choose geometrical dimensions of the cutting macror relief of faltering abrasive tool's working surface that provide required geometrical and physico-mechanical quality parameters of the important machine components' job surfaces.

Key words: cutting ledges, self-sharpening, cutting macror relief, parametrical resonance, thermal stress of grinding process.

Введение

Эксплуатационное качество поверхностного слоя деталей, изготовленных из высоколегированных закаленных сталей, формируется на финишных методах обработки. Одним из наиболее распространенных финишных методов обработки является шлифование, которое позволяет обеспечивать высокую точность и низкую шероховатость поверхностей наиболее ответственных деталей. Процесс шлифования характеризуется очень высокими скоростями резания и большими удельными давлениями, приводящими к возникновению в зоне резания высоких мгновенных температур 600-1300 °С, превышающих структурные и фазовые изменения в поверхностном слое обрабатываемой детали. Структурные изменения в поверхностном слое проявляются тем сильнее, чем интенсивнее выделяется тепло в зоне резания и чем больше продолжительность его воздействия. Для уменьшения теплонапряженности процесса и для обеспечения желаемого качества поверхностного слоя применяют круги с прерывистой рабочей поверхностью [1]. Обработка шлифовальными кругами, рабочая поверхность которых состоит из периодически чередующихся выступов и впадин, сопровождается прерыванием процесса резания, что приводит к снижению температуры шлифования и возникновению в упругой системе станка колебаний. Колебания могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на качество поверхностного слоя обрабатываемой детали. Возбуждение в упругой системе станка вынужденных высокочастотных колебаний приводит к улучшению режущей способности круга и к улучшению условий стружкообразования, что, в конечном итоге, положительно отражается на качестве поверхностного слоя заготовки [2]. Но при шлифовании прерывистыми кругами при определенных условиях в упругой системе станка могут возникнуть параметрический или ударный резонансы, которые отрицательно влияют как на рабочую поверхность инструмента, так и качество поверхностного слоя обрабатываемой детали [3].

Постановка проблемы

В некоторых случаях применение прерывистых кругов не только не устраняет шлифовочные прижоги, а, наоборот, – способствует их появлению. Как правило, такие прижоги имеют циклический характер и причиной их появления являются нежелательные колебания. Недостаточная изученность динамических явлений, сопровождающих процесс прерывистого шлифования, сдерживает широкое применение прерывистых кругов. Одной из причин образования прижогов при шлифовании является засаливание рабочей поверхности абразивного инструмента и, как следствие, снижение его режущей способности. Для восстановления режущей способности абразивного инструмента необходимо его правка [4]. Частая правка круга снижает производительность шлифования. Для уменьшения числа правок необходимо создать условия, способствующие самозатачиванию режущих зерен. Условия самозатачивания можно обеспечить созданием новых шлифовальных кругов с оптимальным сочетанием прочностей режущих зерен и связки [5], созданием новых абразивных материалов [6], использованию прерывистых кругов, работа которых может сопровождаться высокочастотными колебаниями с малыми амплитудами, способствующими самообразованию режущего микрорельефа рабочей поверхности абразивного

инструмента, а также дополнительному введению вибрации в зону резания с помощью специальных устройств. Из-за громоздкости аппаратуры и сложности ее установки на станке вибрационное шлифование не получило широкого распространения. Применение прерывистых шлифовальных кругов сдерживается невозможностью их массового изготовления. Кроме того, в технической литературе решение проблем снижения теплонапряженности процесса шлифования, предотвращения появления параметрических и ударных резонансов и обеспечения условий самозатачивания абразивного инструмента посредством применения прерывистых кругов с определенным режущим профилем, зачастую происходит по отдельности, а не в комплексе.

Цель работы

Целью настоящей работы является выявление влияния геометрических параметров режущего контура прерывистого шлифовального круга на вибрации и температурно-силовые условия в зоне резания и на основе этого разработка рекомендаций по выбору геометрических показателей макро рельефа рабочей поверхности прерывистого абразивного инструмента, обеспечивающих требуемые параметры физико-механического состояния обрабатываемой поверхности деталей машин.

Основная часть работы

Для выявления влияния макрогеометрических показателей режущего рельефа прерывистого абразивного инструмента на динамические и тепловые условия шлифования были произведены соответствующие расчеты. Параметрическая неустойчивость упругой системы шлифовального станка определялась из условия [7]

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

где

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

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

где τ_1, τ_2 – времена прохождения над обрабатываемой поверхностью выступа и впадины прерывистого круга, с;

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

t_L – глубина резания, установленная по лимбу, м;

t_ϕ – фактическая глубина резания, м;

C_o – приведенная жесткость упругой системы станка, Н/м;

h – величина, характеризующая угасание колебаний во времени, 1/с.

Расчет амплитуды вынужденных колебаний, возникающих в результате прерывания процесса резания, производится по формуле [7]

$$Y = \frac{Y_{cm} \cdot \tau_1 \cdot k'}{2 \cdot C \cdot \left| \sin \left(\frac{k}{\omega} \right) \right|} \quad (4)$$

где $Y_{cm} = \frac{F_{y.o}}{C}$ – величина отжима сплошного шлифовального круга под действием силы $F_{y.o}$;

k' – собственная частота колебаний, 1/с;

ω – частота вынужденных колебаний, 1/с;

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{(\tau_1 + \tau_2)};$$

C – статическая жесткость, Н/м.

Расчет температур, возникающих при шлифовании прерывистыми кругами, имеющими различное число режущих выступов, производится по формуле [7]:

$$T_k = \frac{2 \cdot \psi}{\sqrt{c \cdot \rho_M \cdot \lambda}} \cdot \sum_{i=1}^k q_i \left[\sqrt{(k-i+1) \cdot \tau_1 + (k-i) \cdot \tau_2} \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{t - \sum_{i=1}^k t_i}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-i+1) \cdot \tau_1 + (k-i) \cdot \tau_2}} \right) - \sqrt{(k-i) \cdot (\tau_1 + \tau_2)} \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{t - \sum_{i=1}^k t_i}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-i) \cdot (\tau_1 + \tau_2)}} \right) \right] \quad (5)$$

где ψ – коэффициент, показывающий, какая доля работы переходит в тепло;

$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_M}$ – температуропроводность обрабатываемого материала;

k – число режущих выступов, проходящих через зону контакта инструмента с деталью;

ρ_M, c, λ – плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$), теплоемкость ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$) и теплопроводность ($\text{Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$) обрабатываемого материала соответственно;

V_{kr} – окружная скорость шлифовального круга, м/с;

q_i – интенсивность теплового потока, формируемая при срезе металла i -ым режущим выступом прерывистого круга, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

t – глубина резания, м;

t_i – толщины срезов, осуществляемых отдельными режущими выступами прерывистого круга, измеряемые в плоскости, перпендикулярной обрабатываемой поверхности, м.

Характер параметрического возбуждения упругой системы станка на разных интервалах изменения количества режущих выступов на прерывистом круге, а также зависимости амплитуды вынужденных колебаний Y и температур шлифования T от числа режущих выступов n показаны на рис.1-б.

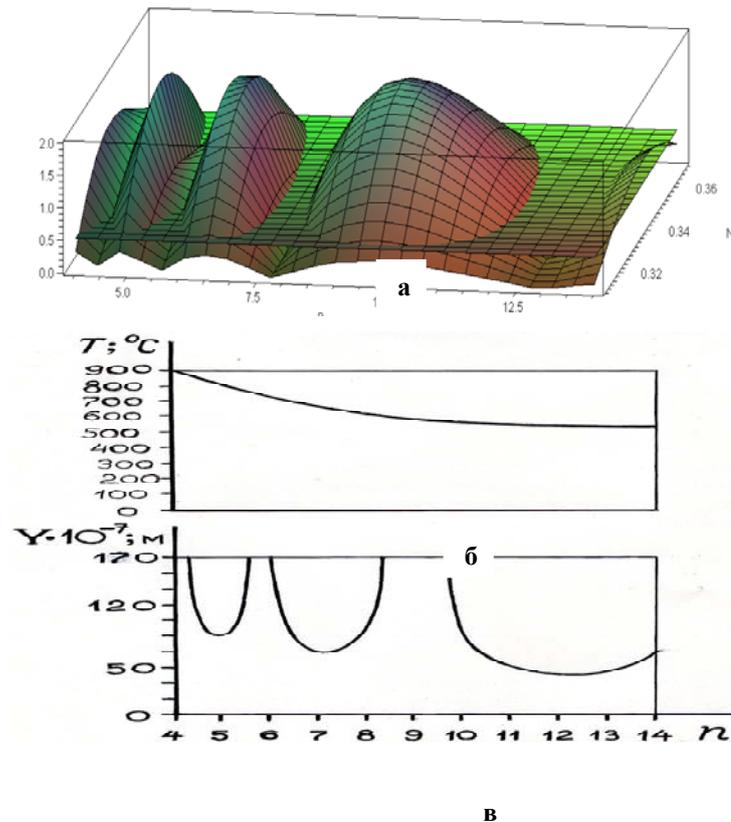


Рис. 1. Зависимости $L = f(n)$, $\frac{1+M}{2} = f(n)$, $T = f(n)$, $Y = f(n)$ в интервале $4 \leq n \leq 14$

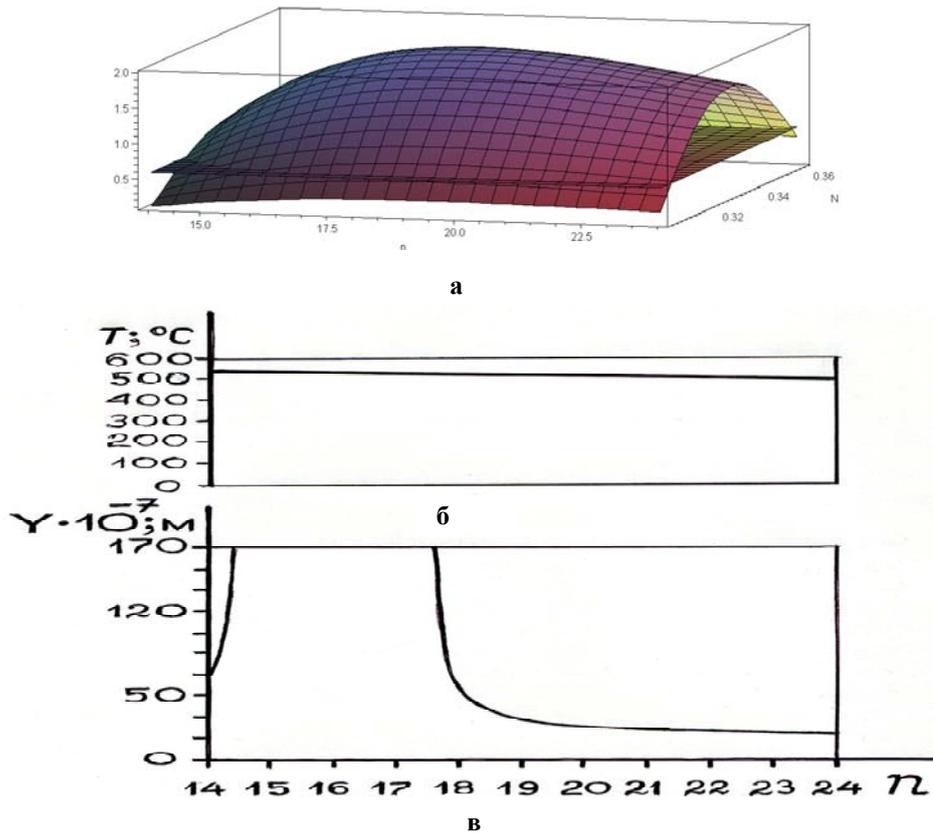


Рис. 2. Зависимости $L = f(n)$, $\frac{1+M}{2} = f(n)$, $T = f(n)$, $Y = f(n)$ в интервале $14 \leq n \leq 24$

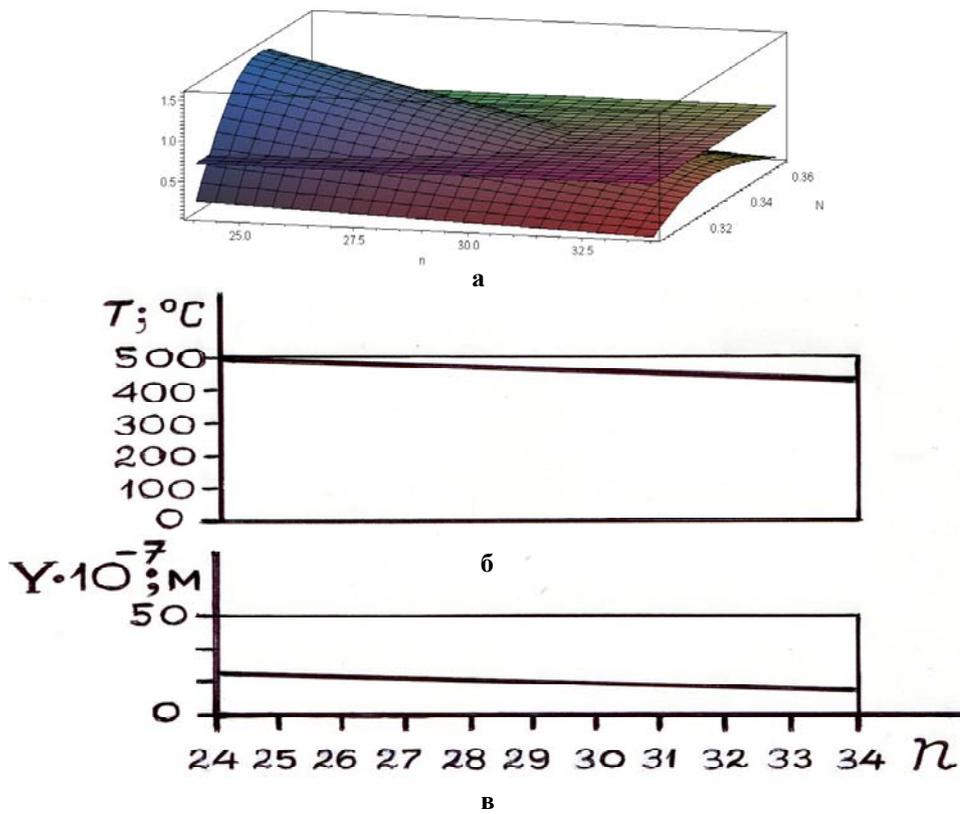


Рис. 3. Зависимости $L = f(n)$, $\frac{1+M}{2} = f(n)$, $T = f(n)$, $Y = f(n)$ в интервале $24 \leq n \leq 34$

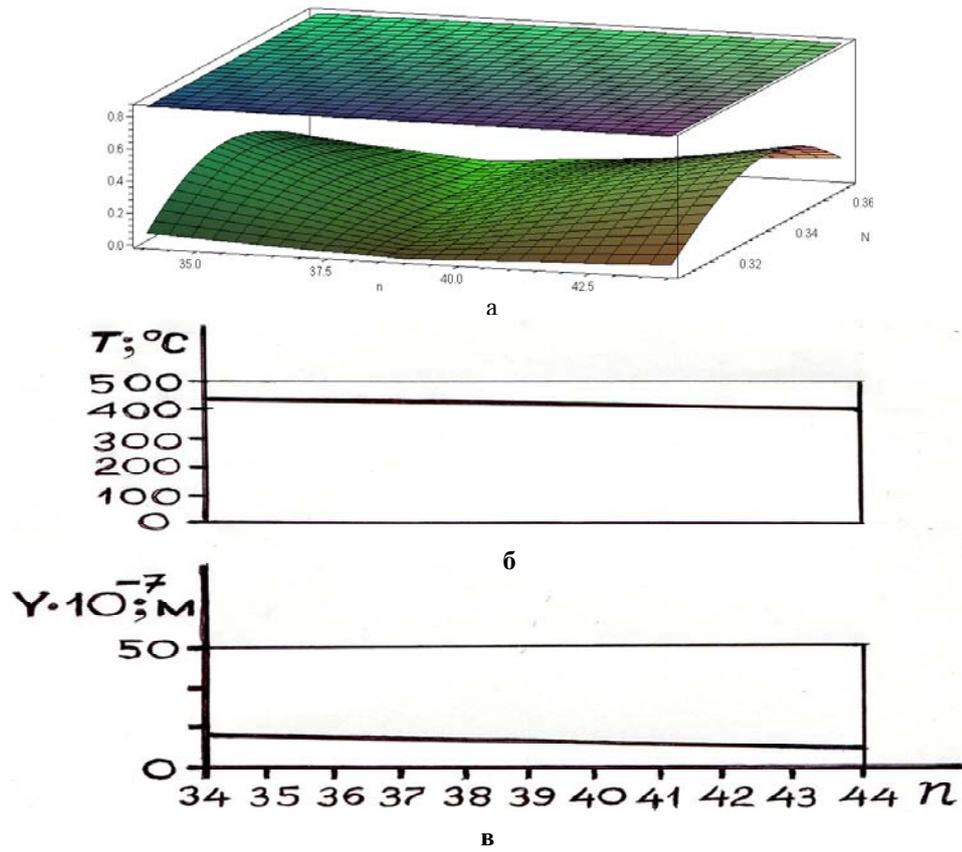


Рис. 4. Зависимости $L = f(n)$, $\frac{1+M}{2} = f(n)$, $T = f(n)$, $Y = f(n)$ в интервале $34 \leq n \leq 44$

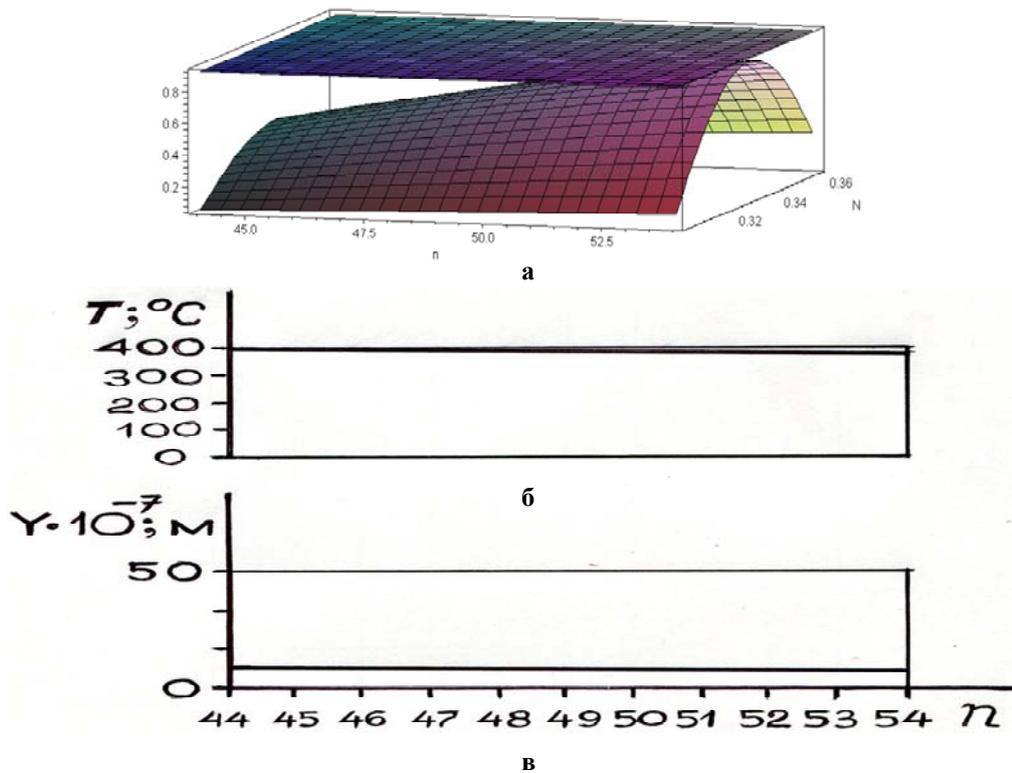


Рис. 5. Зависимости $L = f(n)$, $\frac{1+M}{2} = f(n)$, $T = f(n)$, $Y = f(n)$ в интервале $44 \leq n \leq 54$

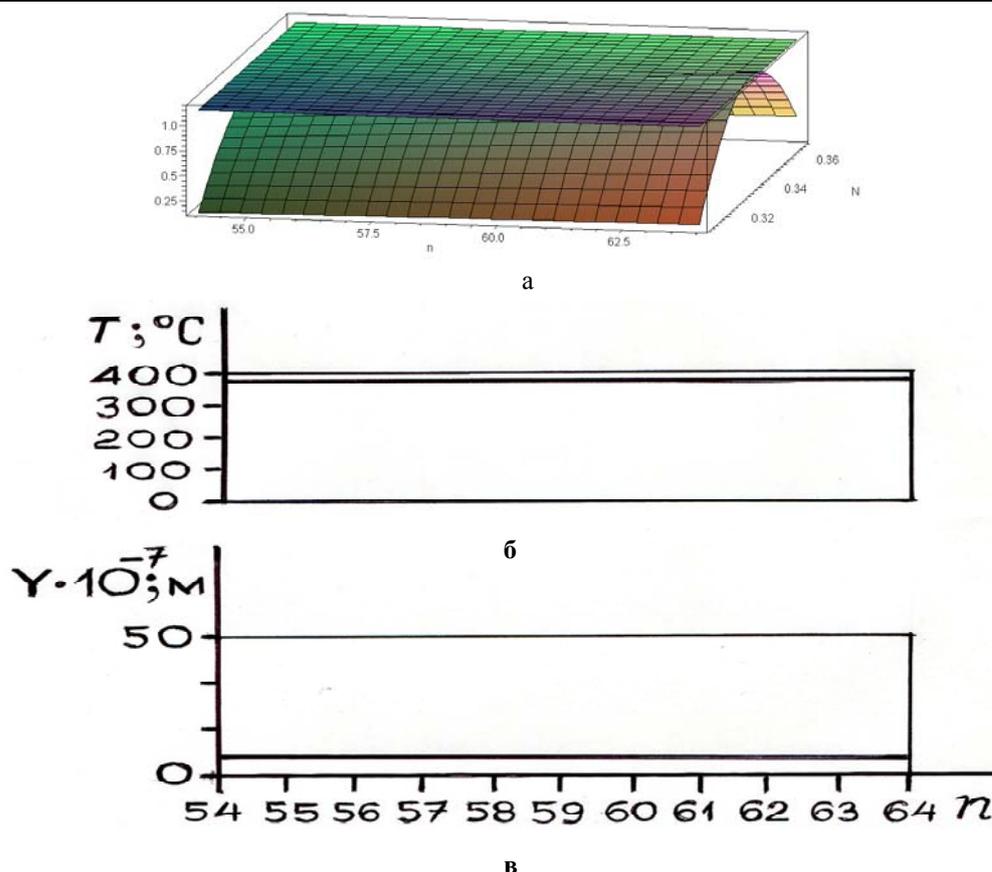


Рис. 6. Зависимости $L = f(n)$, $\frac{1+M}{2} = f(n)$, $T = f(n)$, $Y = f(n)$ в интервале $54 \leq n \leq 64$

В таблице приводится соответствие числа режущих выступов n на прерывистом круге частоте вынужденных колебаний ω при вращении шпинделя шлифовального станка со скоростью 45 об/с.

Количество режущих выступов	n	4	9	14	19	24	29	34	39	44	49	54	59	64
Частота вынужденных колебаний	ω ; Гц	180	405	630	855	1080	1305	1530	1755	1980	2205	2430	2655	2880

Из рис. 1-6 видно, что в интервале чисел режущих выступов на прерывистом круге $30 \leq n \leq 62$ отсутствует параметрический резонанс, температура шлифования почти достигла минимума (т.е. почти не уменьшается), а процесс шлифования сопровождается колебаниями с частотами $\omega = 1350 - 2880$ Гц. В пределах указанного интервала изменения чисел режущих выступов наблюдается уменьшение температуры шлифования и амплитуд вынужденных колебаний, а очерк волнообразной поверхности, представляющий собой график $L = f(n)$ находится ниже очерка плоской поверхности (горизонтальной прямой), описывающего зависимость $\frac{1+M}{2} = f(n)$. Такое взаимное расположение поверхностей (согласно условию (1)) свидетельствует об отсутствии параметрического резонанса в указанном интервале значений чисел режущих выступов.

Режущую способность прерывистых кругов, имеющих различное количество впадин на их рабочей поверхности, можно косвенно оценить по внешнему виду стружки, образующейся при шлифовании. На рис. 7 приведены фотографии стружек, образующихся при шлифовании плоских образцов из стали Р6М5 прерывистыми кругами 1А1 200 × 75 × 5 × 20 КР 160/125 Б8 100, рабочие поверхности которых содержат 30, 34, 38, 42, 46, 50 впадин. Величина отношения ширины впадины к длине режущего выступа для всех кругов одинакова. Шлифование осуществлялось на плоско-шлифовальном станке методом врезания на режиме: окружная скорость круга 35 м/с; скорость заготовки 6 м/мин; глубина резания 0,025 мм.

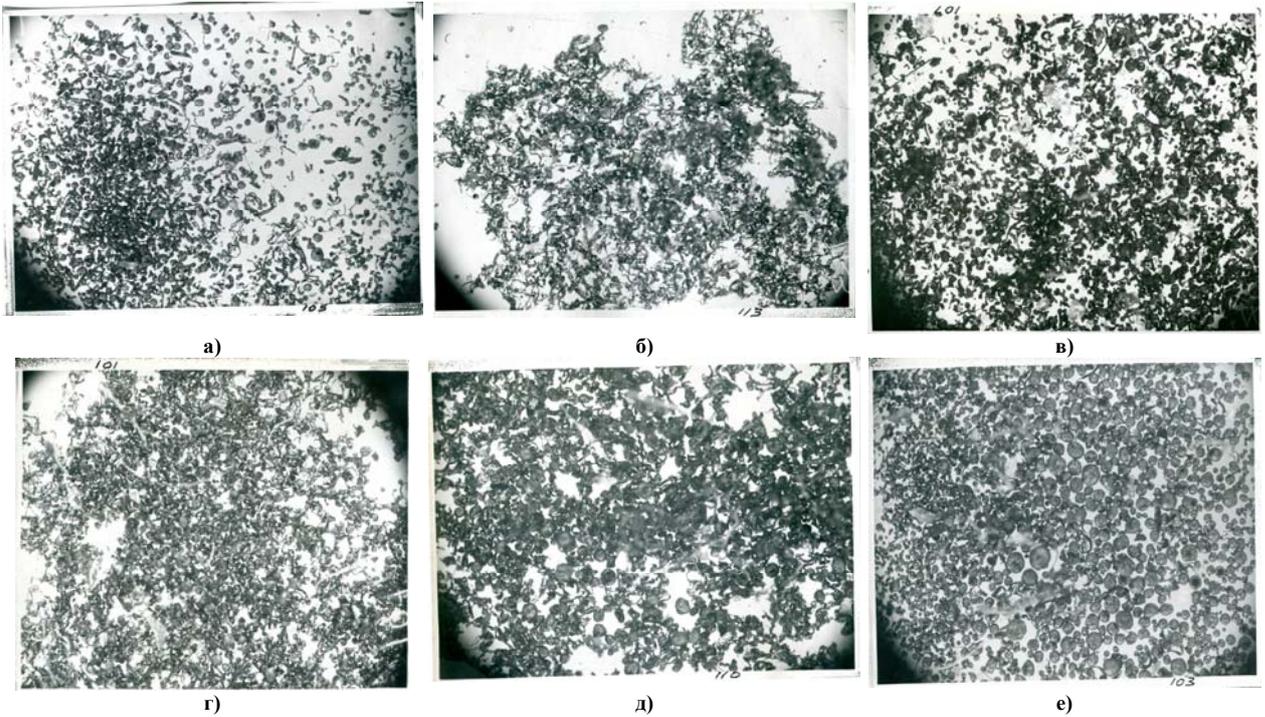


Рис.7. Внешний вид стружки, образующейся при шлифовании прерывистыми кругами, имеющими 20 (а), 24 (б), 28 (в), 32 (г), 36 (д), 40 (е) режущих выступов

Из рис. 7 видно, что стружка имеет запятообразную и сферическую форму. С увеличением количества впадин на круге от 30 до 42 состав стружки меняется в сторону уменьшения количества запятообразных элементов стружки и возрастания числа сферических элементов. Причем с возрастанием количества впадин наблюдается увеличение размеров шарообразных элементов стружки. Стружка, образующаяся при шлифовании кругами, имеющими 46 и 50 впадин, имеет вид крупных шариков. В составе этой стружки отсутствуют запятообразные элементы. Увеличение размеров шариков свидетельствует об возрастании толщин срезов, приходящихся на единичные режущие зерна, т.е. об увеличении режущей способности кругов.

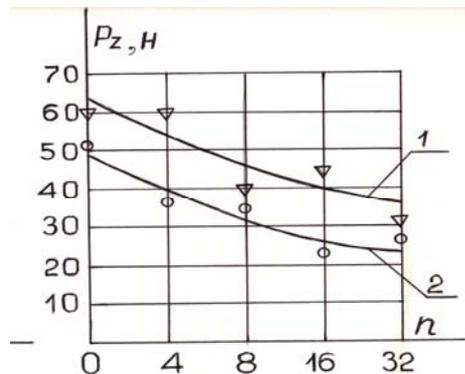


Рис.8. Зависимость тангенциальной составляющей силы резания P_z от количества впадин n на прерывистом круге

На рис.8 представлены экспериментальные зависимости [7] тангенциальной составляющей P_z силы резания от числа режущих выступов n на прерывистом круге, построенные для двух глубин резания: $t_1 = 0,10 \cdot 10^{-3}$ м и $t_2 = 0,06 \cdot 10^{-3}$ м. Из графиков $P_z = f(n)$ видно, что чем больше прорезей на абразивном круге, тем меньше P_z . Этот факт тоже объясняется тем, что увеличение числа прорезей способствует более интенсивному самозатачиванию режущих зерен. Из-за наличия колебаний обрабатываемый материал становится более хрупким, что способствует уменьшению работы пластической деформации [8]. Увеличение частоты колебаний благоприятствует сходу стружки, так как трение движения начинает доминировать над трением покоя [3].

Расчеты по формулам (1) – (5) и проведенные эксперименты показали, что для исходных данных, заложенных в эти расчеты, применение шлифовальных прерывистых кругов с числом впадин 30 -64 исключает возможность появления в упругой системе станка ударного и параметрического резонансов, предотвращает возникновение на обрабатываемых поверхностях прижогов и трещин, а также создает условия, благоприятствующие самозатачиванию режущего макропрофиля абразивного инструмента. Для

получения 8-го класса шероховатости обрабатываемой поверхности числа режущих выступов на прерывистых кругах должны укладываться в интервал $54 \leq n \leq 64$, так как при этом амплитуда колебаний не превышает $Y = 0,5$ мкм. Для выявления влияния количества режущих выступов на шероховатость обрабатываемой поверхности были проведены эксперименты. Плоские образцы из стали 7ХГ2ВМ обрабатывались на плоскошлифовальном станке ЗГ71М прерывистыми кругами Э9А40СМ2К с числом режущих выступов $n = 24$ и $n = 47$, и одинаковой величиной отношения ширины впадины l_2 к длине выступа l_1 $\left(\frac{l_2}{l_1} = 2\right)$ на режимах: $V_{кр} = 35$ м/с; $V_{дет} = 10$ м/мин; без поперечной подачи; без охлаждения; с глубинами резания $t = 0,03$ мм; $t = 0,05$ мм. Результаты экспериментов приведены на рис.9.

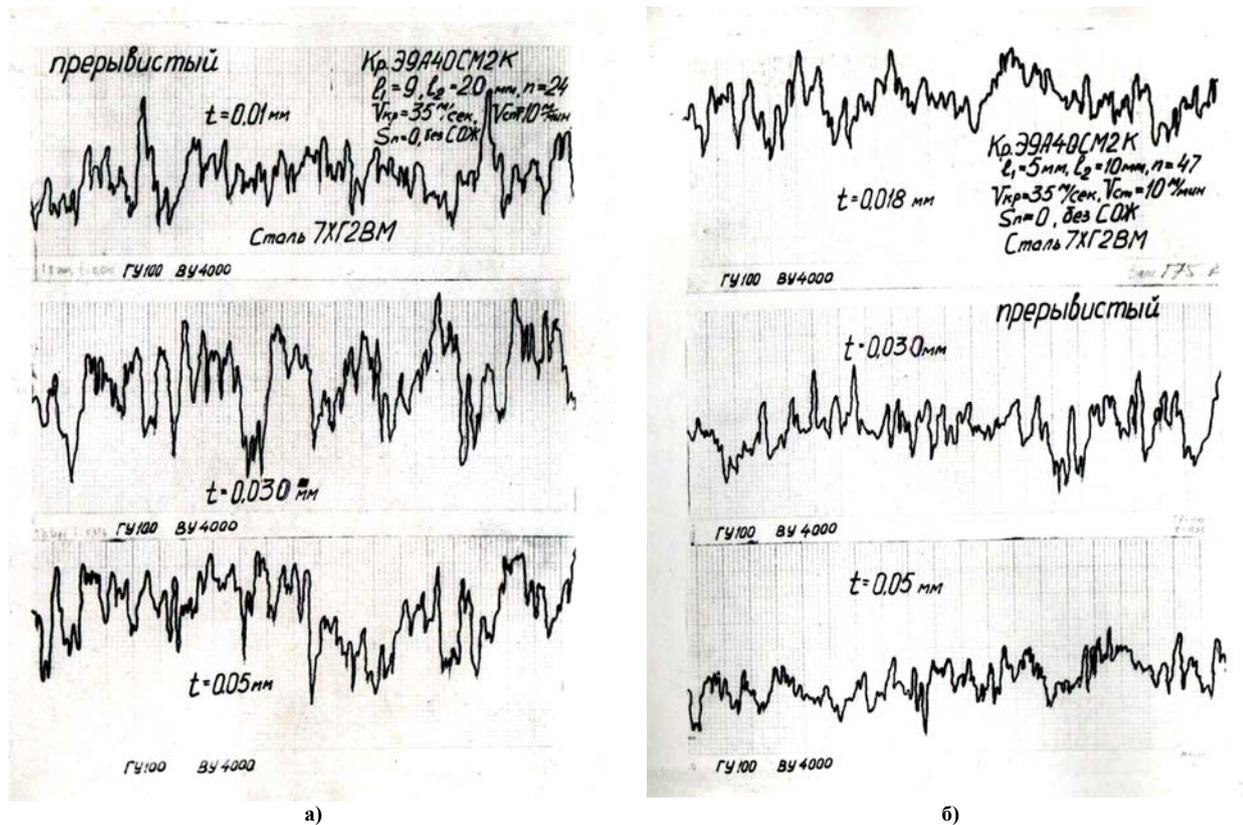


Рис.9. Профиллограммы шероховатости поверхности при шлифовании прерывистыми кругами с числами режущих выступов $n = 24$ (а) и $n = 47$ (б)

Из рис. 9 видно, что с увеличением количества прорезей на шлифовальном круге снижается шероховатость обрабатываемой поверхности. Изготовить шлифовальный круг с таким большим числом впадин достаточно сложно, так как каждую впадину придется нарезать по отдельности. Поэтому вместо прерывистых шлифовальных кругов с большим количеством прорезей можно использовать шлифовальные круги с регулярно сформированным макрорельефом на их рабочих поверхностях [9]. Насеченный круг [9] получают на базе сплошного круга путем выкальвания на его рабочей поверхности рядов лунок, создающих интервалы разрыва в процессе шлифования, как впадины у прерывистых кругов. В данном случае под длиной режущего выступа понимается расстояние между двумя соседними рядами лунок, а под шириной впадины – ширина ряда, равная диаметру лунки.

Выводы

1. Теоретически выявлено влияние размеров элементов режущего макрорельефа рабочей поверхности прерывистого шлифовального круга на теплонапряженность процесса шлифования и на появление в упругой системе станка ударных и параметрических резонансов.
2. Экспериментальным путем установлено, что увеличение числа режущих выступов на прерывистом шлифовальном круге благотворно влияет на процесс самоформления его режущего микрорельефа, т.е. на процесс самозатачивания режущих зерен.
3. Сформулированы рекомендации по выбору геометрических показателей режущего макрорельефа рабочей поверхности прерывистого абразивного инструмента, обеспечивающих требуемые геометрические и физико-механические параметры качества обрабатываемых поверхностей ответственных деталей машин.

Література

1. Новиков, Ф.В. К вопросу о сущности прерывистого шлифования / Новиков Ф.В., Якимов А.А. //Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.—Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – С.177-182.
2. Новиков, Г.В. Физическая сущность и эффективность вибрационного резания /Г.В. Новиков //Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: труды 7-й Междунар. Науч.-техн. конф. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2003. – С.85-87.
3. Свирщёв, В.И. Технологические основы и обеспечение динамической стабилизации процессов шлифования: дисс. ... докт. техн. наук: 05.02.08. – Пермь, 1996. – 452 с.
4. Белов, С.Г. Правка шлифовальных кругов как способ повышения эффективности абразивной обработки /С.Г. Белов, Л.П. Калафанова //Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. трудов. – Краматорск: Изд-во ДГМА, 2004. – Вып.15. –С.78-84.
5. Худобин, Л.В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов /Л.В. Худобин, А.Н. Унянин. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. –298 с.
6. Яковлев, П.С. Современные материалы и разработки в абразивной промышленности //П.С. Яковлев //Стружка, 2004. – Вып.1. – С.49-51.
7. Якимов, О.О. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару зубів високоточних зубчастих коліс при шліфуванні: Дис. ...док. техн. наук: 05.02.08 – Одеса, 2015. – 472 с.
8. Марков, А.И. Ультрозвуковая обработка материалов /А.И. Марков //М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
9. А.С. №854697(СССР). Способ правки шлифовального круга /В.И. Свирщёв, А.Н. Паршаков. Заявл. 08.02.79., №2722008/25-08; Оpubл. В Б.И. 1981., № 30.

References

1. Novikov F.V. K voprosu o sushhnosti preryvistogo shlifovaniya / Novikov F.V., Jakimov A.A. //Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn.sb.—Har'kov: NTU «HPI», 2001. – S.177-182.
2. Novikov G.V. Fizicheskaja sushhnost' i jeffektivnost' vibracionnogo rezaniya /G.V. Novikov //Fizicheskie i komp'juternye tehnologii v narodnom hozjajstve: trudy 7-j Mezhdunar. Nauch.-tehn. konf. – Har'kov: HNPK «FJeD», 2003. – S.85-87.
3. Svirshhiov V.I. Tehnologicheskie osnovy i obespechenie dinamicheskoi stabili-zacii processov shlifovaniya: diss. dokt. tehn. nauk: 05.02.08. – Perm', 1996. – 452 s.
4. Belov S.G. Pravka shlifoval'nyh krugov kak sposob povysheniya jeffektivnosti abrazi-vnoj obrabotki /S.G. Belov, L.P. Kalafatova //Nadezhnost' instrumenta i optimi-zacija tehnolog-icheskikh sistem: sb. nauch. trudov. – Kramatorsk: Izd-vo DGMA, 2004. – Vyp.15. –S.78-84.
5. Hudobin L.V. Minimizacija zasalivaniya shlifoval'nyh krugov /L.V. Hudobin, A.N. Unjanin. – Ul'janovsk: UIGTU, 2007. –298 s.
6. Jakovlev P.S. Sovremennye materialy i razrabotki v abrazivnoj promyshlen-nosti //P.S. Jakovlev //Struzhka, 2004. – Vyp.1. – S.49-51.
7. Jakimov O.O. Tehnologichne zabezpechennja jakosti poverhneвого шару zubiv viso-kotochnih zubchastih kolis pri shlifuvanni: Dis. ...dok. tehn. nauk: 05.02.08 – Odesa, 2015. – 472 s.
8. Markov A.I. Ul'trozvukovaja obrabotka materialov /A.I. Markov //M.: Mashi-nostroenie, 1980. – 237 s.
9. A.S. №854697(SSSR). Sposob pravki shlifoval'nogo kruga /V.I. Svirshhiov, A.N. Par-shakov. Zajavl. 08.02.79., №2722008/25-08; Opubl. V B.I. 1981., № 30.

Рецензія/Peer review : 14.2.2016 р.

Надрукована/Printed : 26.3.2016 р.