

УДК 621.9.06.-229.331



Якимов А.А.,
д.т.н. професор,
Одеський
національний
політехнічний
університет



Клименко Н.Н.,
к.т.н. доцент,
Одеський
національний
політехнічний
університет



Бовнегра Л.В.,
к.т.н. доцент,
Одеський
національний
політехнічний
університет
dlv5@ukr.net



Синько І.С.,
к.т.н. доцент,
Одеський
національний
політехнічний
університет
inna-designe@mail.ru

ВЛИЯНИЕ МАКРОПРОФИЛЯ РЕЖУЩЕГО ВЫСТУПА ПРЕРЫВИСТОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ И ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

А.А. Якимов, Л.В. Бовнегра, И.С. Синько, Н.Н. Клименко. Влияние макропрофиля режущего выступа прерывистого алмазного шлифовального круга на показатели качества поверхностного слоя износостойких плазменных покрытий и твердых сплавов. В работе рассмотрено алмазное шлифование твердых сплавов и износостойких покрытий прерывистыми кругами с различной макрогеометрией рабочей поверхности с целью выявления условий, обеспечивающих качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Установлено, что «заборная» поверхность режущего выступа прерывистого круга при определенных условиях может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на формирование качественных характеристик поверхностного слоя шлифованных деталей.

A.A. Yakimov, L.V. Bovnegra, I.S. Synko, N.N. Klimenko. Impact of a macrocross-section of the cutting ledge of intermittent diamond abrasive wheel on the quality indicators of the surface layer of wear-resistant plasma coating and solid alloys. In the work reviewed the diamond grinding of solid alloys and durable coatings by intermittent circles with a different macro geometry of the working surface to identify conditions that ensure the required quality of the surface layer of parts that are processed. It was found that the "fence" of the cutting surface of the ridge of intermittent circle in certain conditions may have both positive and negative effects on forming the qualitative characteristics of the surface layer of ground parts.

Введение. В последнее время в машиностроении получили широкое применение износостойкие композиционные покрытия на основе тугоплавких соединений (карбида титана, карбида вольфрама и т.д.), плакированные металлом-связкой и твердые славы сложно-химического состава на основе титана, вольфрама и т.д. Износостойкие композиционные покрытия получают напылением плазменной струей. Их используют для упрочнения и восстановления изношенных деталей. Твердые сплавы широко используются при изготовлении режущего инструмента, пуансонов и матриц вырубных и вытяжных штампов, а также для армирования мерительного инструмента.

Качество поверхностного слоя твердых сплавов и износостойких плазменных покрытий формируется на операции шлифования. Твердость тугоплавких покрытий и твердых сплавов соизмерима с твердостью абразивного материала, поэтому их обрабатывают алмазными кругами на бакелитовой или керамической связках. Процесс шлифования характеризуется высокой теплонапряженностью. При шлифовании твердых сплавов и износостойких плазменных покрытий температуры шлифования достигают $800 - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1,2] и приводят к образованию трещин на обрабатываемых поверхностях. Высокая теплонапряженность процесса шлифования способствует возникновению на границе «покрытие – подложка» больших растягивающих остаточных напряжений ($180 - 200\text{ МПа}$), способных привести к отслаиванию покрытия [2].

Так как теплофизические и упругие характеристики материала покрытия отличаются от соответствующих характеристик материала подложки, то в силу совместной деформации возникают значительные температурные напряжения, приводящие к образованию трещин (рис. 1) [15].

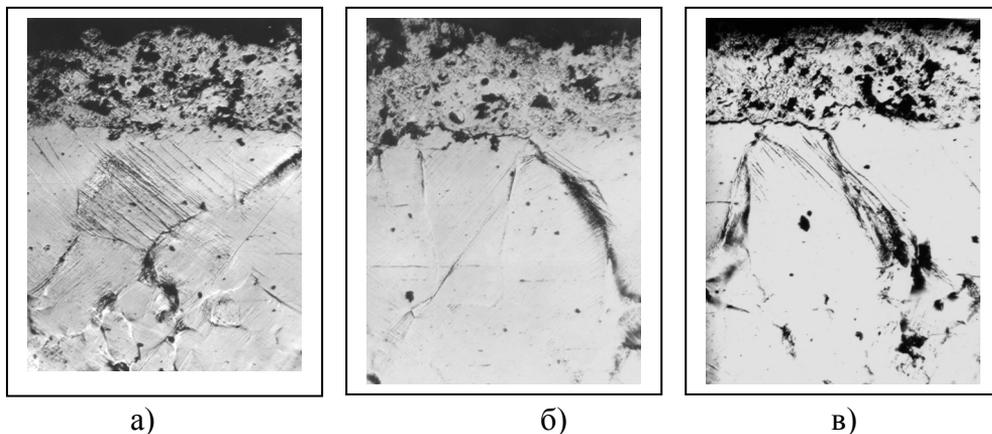


Рис. 1. Кинетика роста трещин в стали 45 с покрытием, прошлифованным кругом 24A40CM1K1 с охлаждением эмульсией и режимами $v_{кр}=35\text{ м/с}$, $v_{д}=15\text{ м/мин}$, $s=2,25\text{ мм/дв.ход}$, $t=0,003\text{ мм}$

Кроме того, высокие температуры способствуют резкому повышению расхода алмазов, так как при температурах более 700 – 750°C алмаз переходит в графит [1]. Известно, что снизить теплонапряженность процесса шлифования можно, применяя алмазные круги с прерывистой рабочей поверхностью [1, 3, 4, 5] (рис. 2).

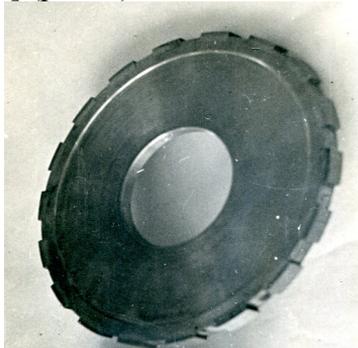


Рис. 2. Прерывистый алмазный круг

На рис. 3 показан внешний вид образцов из твердых сплавов, шлифованных сплошным (слева) и прерывистым (справа) кругами, на котором видно, что после шлифования обычным кругом выявляется сетка шлифовочных трещин, а после шлифования прерывистым кругом трещины отсутствуют.

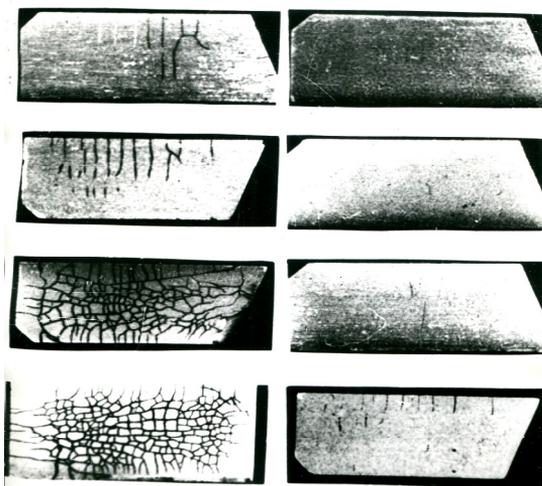


Рис. 3. Внешний вид шлифовочных трещин при обработке твердосплавных пластин (сплав Т15К6), шлифованных сплошным (слева) и прерывистым (справа) кругами при различных скоростях (сверху вниз):

$$V_{kp} = 3 \text{ м/мин}; \quad V_{kp} = 8 \text{ м/мин}; \quad V_{kp} = 12 \text{ м/мин}; \quad V_{kp} = 15 \text{ м/мин};$$

Изучению тепловых явлений при алмазном шлифовании твердых сплавов и износостойких покрытий и влияния их на качество поверхностного слоя посвящены работы: [1 – 4], [6 – 15].

В работах [1, 3] рассматриваются пути снижения теплонапряженности процесса алмазного шлифования твердых сплавов, один из которых – применение кругов с прерывистой рабочей поверхностью. В этих работах отмечается, что при шлифовании твердых сплавов алмазными прерывистыми кругами на их режущих выступах формируются «заборные» поверхности, изменяющие характер удаления обрабатываемого материала отдельными режущими зернами, что приводит к снижению теплонапряженности процесса шлифования. Однако в этих работах не рассмотрено влияние «заборных» поверхностей на параметрические колебания, возникающие в следствие периодического прерывания процесса шлифования во времени.

Цель работы. Установить связь макрорельефа рабочей поверхности прерывистого шлифовального круга с выходными показателями качества поверхностного слоя твердых сплавов и износостойких покрытий.

Основная часть работы. В процессе шлифования происходит изменение профиля режущего выступа прерывистого круга. По мере износа круга на режущих выступах образуются «заборные» поверхности, имеющие некоторый угол атаки α к плоскости резания (рис.4, рис.5) [5].

Из рис. 4 [5] видно, что точка профиля режущего выступа, ограничивающая «заборную» поверхность, в процессе работы круга смещается от начала выступа к его концу. Режущие выступы приобретают установившуюся форму после полного самоформления профиля (кривая, помеченная крестиками на рис.4 [5]). С этого момента условия резания прерывистыми кругами сохраняются длительное время стабильными. Самозатачиваемость круга протекает равномерно по всему профилю с сохранением постоянного угла атаки.

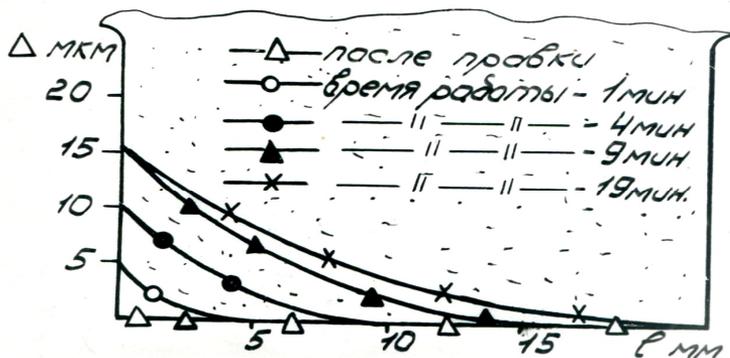


Рис. 4. Формирование «заборной» поверхности режущего выступа.

Δ – величина радиального разрушения;

l – расстояние по длине режущего выступа.

Характер «заборной» поверхності залежить від жорсткості еластичної системи станка, від глибини шліфування і від конструкції прерывистого круга. Чем больше глубина резания, тем больше угол атаки α (рис. 5).

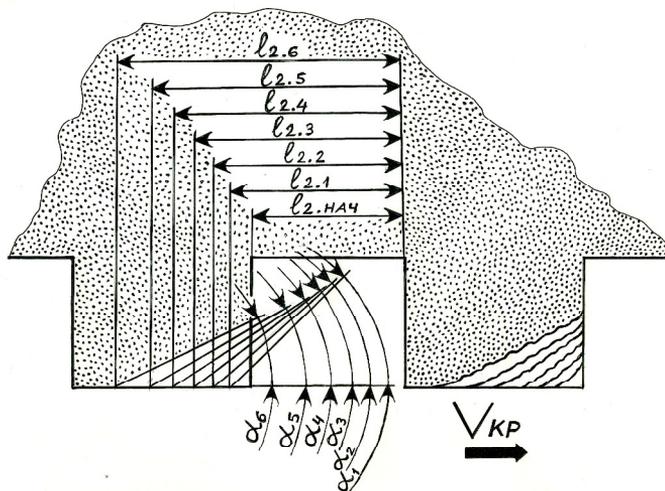
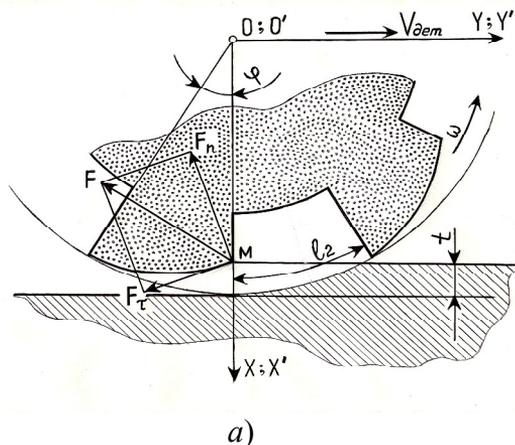
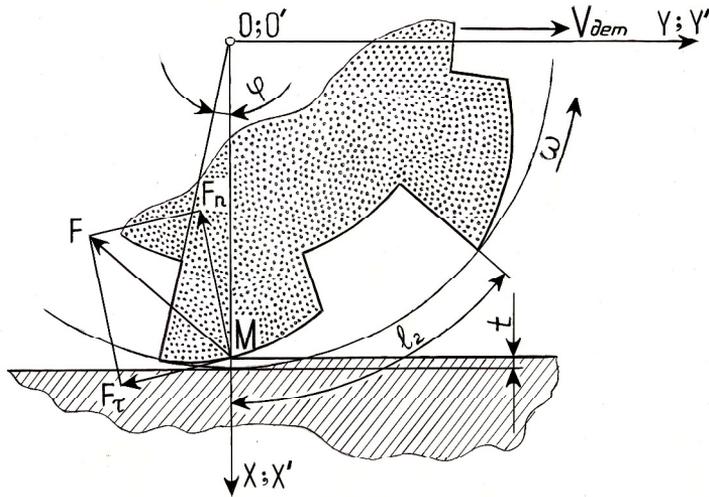


Рис. 5. Динамика формирования профиля режущего выступа прерывистого круга

Из рис.5 видно, что по мере износа режущих выступов прерывистого круга происходит увеличение размеров впадин l_2 . Если шлифование происходит с той глубиной резания, при которой происходило формирование «заборной» поверхности выступа (на предварительном проходе), то участки, длины которых определяются разностями $l_{2,i}$ и $l_{2,нач}$, являются рабочими участками и принадлежат к рабочей поверхности выступа. Если же шлифование производится с меньшими глубинами резания (на окончательном проходе), то эти участки не будут участвовать в резании и, следовательно, будут принадлежать впадине. Это хорошо видно из рис.6.





б)

Рис. 6. Увеличение протяженности впадины l_2 прерывистого круга при уменьшении глубины резания t

В работе [16] профиль режущего выступа прерывистого круга, обеспечивающий при минимальных энергетических затратах максимальную производительность и самозатачиваемость профиля, предлагается рассчитывать по формуле

$$\rho = R_{kp} - \frac{V_{dem} \cdot f}{\omega \cdot \left[f \cdot \cos \varphi_1 - \left(\sqrt{1 + f^2} + 1 \right) \cdot \sin \varphi_1 \right]}, \quad (1)$$

где ρ – расстояние от центра шлифовального круга до точки профиля режущего выступа; R_{kp} – радиус круга; V_{dem} – скорость перемещения детали на плоскошлифовальном станке; f – коэффициент трения; $\varphi \leq \varphi_1 \leq 0^\circ$, φ – угловой размер режущего выступа прерывистого круга; ω – угловая скорость вращения круга. Из анализа приведенной формулы следует, что интенсивному самозатачиванию профиля режущего выступа способствуют увеличение скорости детали V_{dem} и уменьшение угловой скорости вращения круга ω .

Проанализируем, как повлияет уменьшение окружной скорости круга V_{kp} при неизменной скорости детали V_{dem} на параметрическую устойчивость упругой системы плоскошлифовального станка.

Параметрическая неустойчивость упругой системы определяется условием [17]

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

где

$$L = \frac{e^{-h(\tau_1+\tau_2)}}{h(k_2 + h \sin 2k_2 \tau_1)} \left[k_1^2 \sin k_1 \tau_1 \sin k_2 \tau_2 - \right. \\ \left. - 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \cos k_2 \tau_1 \cdot \cos k_1 \tau_1 \cdot \cos k_2 (\tau_1 + \tau_2) - \right. \\ \left. - k_2^2 \sin k_1 \tau_1 \sin (2 \cdot k_2 \tau_1 + k_2 \tau_2) \right]; \quad (3)$$

$$M = \frac{k_1 k_2 e^{-2h(\tau_1+\tau_2)} \cos (2 \cdot k_2 \cdot (\tau_1 + \tau_2))}{h(k_2 + h \sin 2k_2 \tau_1)}, \quad (4)$$

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

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

t_n – 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.

m – приведенная масса шлифовального круга, (Н·с²)/м.

Из рис.7 видно, что окружная скорость круга V_{kp} оказывает весьма существенное влияние на параметрическое возбуждение упругой системы плоскошлифовального станка. При $V_{kp} = 35$ м/с и $V_{kp} = 30$ м/с прослеживается закономерность: с возрастанием K_{np} (величины отношения ширины впадины l_2 к длине выступа l_1) наблюдается расширение безразмерных зон ($\Delta_{35} < \Delta'_{35}; \Delta_{30} < \Delta'_{30}$).

Например, при шлифовании с окружной скоростью $V_{kp} = 35$ м/с самая широкая зона безрезонансной работы упругой системы станка ограничена интервалом $0,91 \leq K_{np} \leq 0,97$.

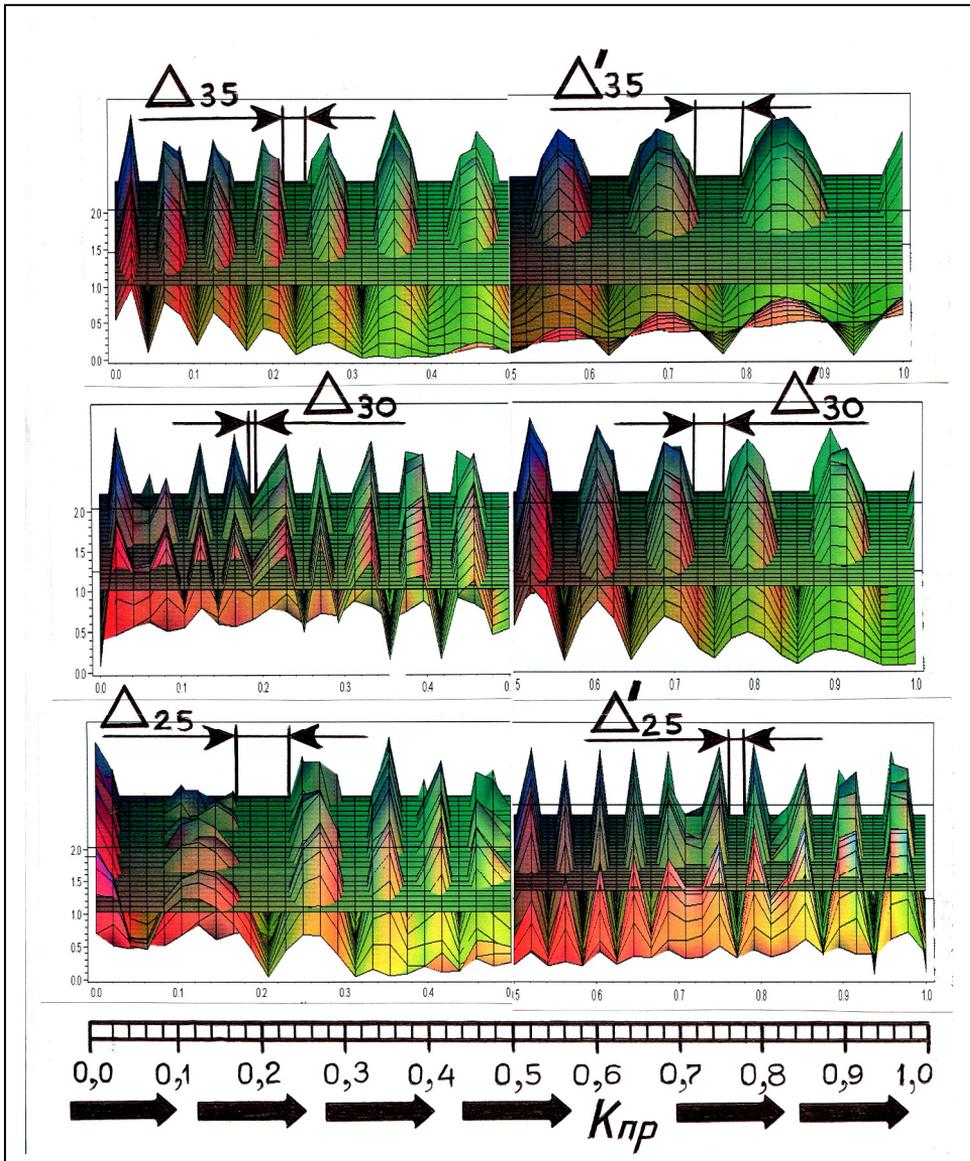


Рис. 7. Параметрические возмущения, возникающие в упругой системе станка при шлифовании прерывистыми кругами с $0 < K_{пр} \leq 1$ на скоростях резания $V_{кр} = 35$ м/с (верхний ряд) $V_{кр} = 30$ м/с (средний ряд), $V_{кр} = 25$ м/с (нижний ряд).

При шлифовании с окружной скоростью круга $V_{кр} = 25$ м/с характер закономерности меняется на противоположный: с увеличением коэффи-

циента прерывистости K_{np} происходит сужение безрезонансных зон ($\Delta_{25} > \Delta'_{25}$). При скорости резания $V_{kp} = 25$ м/с самая широкая зона параметрической устойчивости заключена в пределах $0,16 \leq K_{np} \leq 0,22$. Такая же закономерность прослеживается на рис. 8 и рис. 9, где с увеличением K_{np} безрезонансные зоны сужаются ($B < B < A$). Самая широкая из этих зон (зона А) ограничена пределами $0,35 \leq K_{np} \leq 0,45$.

Из рис.7 видно, что окружную скорость круга V_{kp} можно использовать для расширения зон параметрической устойчивости упругой системы станка. Например, при скорости $V_{kp} = 35$ м/с параметрическая устойчивость обеспечивается при больших значениях коэффициента прерывистости: $0,74 \leq K_{np} \leq 0,80$, $0,91 \leq K_{np} \leq 0,97$, но шлифование алмазными прерывистыми кругами с широкими прорезями сопровождается сколами кромок на обрабатываемых твердосплавных изделиях, и ухудшением шероховатости поверхности.

При $V_{kp} = 25$ м/с параметрическая устойчивость обеспечивается при малых размерах прорезей $0,16 \leq K_{np} \leq 0,22$. При этом улучшается шероховатость поверхности и уменьшается вероятность образования сколов на кромках обрабатываемых твердосплавных пластин.

Таким образом, при уменьшении окружной скорости круга V_{kp} закономерность параметрической устойчивости упругой системы станка от коэффициента прерывистости K_{np} шлифовального круга носит малопредсказуемый характер. Поэтому нельзя говорить о том, что самозатачиваемость алмазных прерывистых кругов можно обеспечить уменьшением их окружной скорости V_{kp} . Варьированием скорости резания можно добиться расширения зон параметрической устойчивости. Например, если прерывистый круг имеет коэффициент прерывистости $K_{np} = 0,2$, то можно, варьируя окружной скоростью круга (в данном случае – уменьшая ее до $V_{kp} = 25$ м/с), обеспечить безрезонансную работу упругой системы станка.

На рис. 8, рис. 9 помимо прямолинейных зон (А, Б, В), ограниченных только величинами отношений $\frac{l_2}{l_1}$ размеров прорезей к длинам выступов, показаны зоны параметрической устойчивости в виде искривленных полос I, II, III, IV, V, VI, которые представляют собой совокупности таких значений $\frac{l_2}{l_1}$ и таких чисел режущих выступов n , при которых в упругой

системе плоскошлифовального станка не возникает параметрический резонанс.

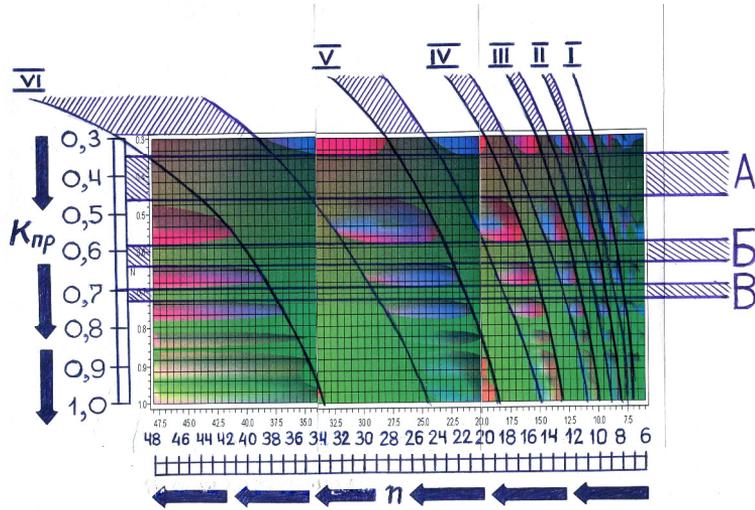


Рис.8. Зоны параметрической устойчивости упругой системы плоскошлифовального станка в виде прямых (А, Б, В) и искривленных (I, II, III, IV, V, VI) полос для $\frac{t_l}{t_\phi} = 2,0$

Рис. 9. Зоны параметрической устойчивости упругой системы плоскошлифовального станка в виде прямых (А, Б, В) и искривленных (I, II, III, IV, V, VI) полос для $\frac{t_l}{t_\phi} = 1,5$

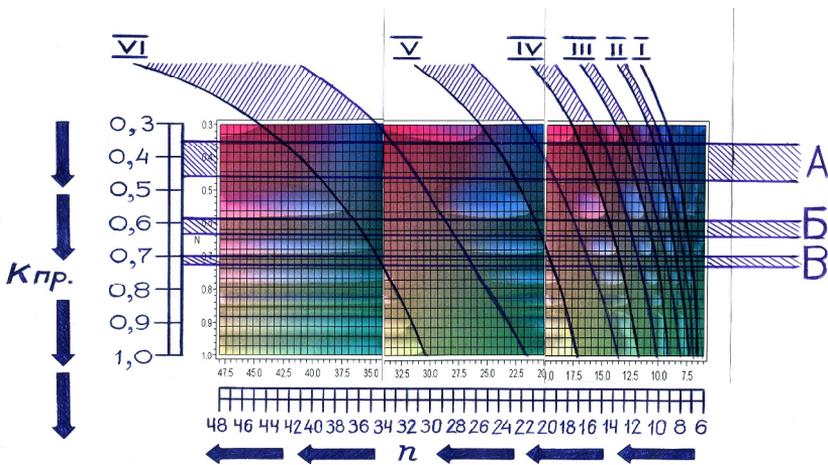


Рис. 9. Зоны параметрической устойчивости упругой системы плоскошлифовального станка в виде прямых (А, Б, В) и искривленных (I, II, III, IV, V, VI) полос для $\frac{t_l}{t_\phi} = 1,5$

(I, II, III, IV, V, VI) полос для $\frac{t_l}{t_\phi} = 1,5$

Из этих рисунков видно, что ширина этих зон и степень их искривленности возрастают в направлении увеличения количества режущих выступов n на прерывистом круге.

Из рис.10 видно, что уменьшение режущей способности шлифовального инструмента (т.е. возрастание величины отношения глубины резания, установленной по лимбу станка t_l , к фактической глубине резания t_ϕ) сдвигает зоны параметрической устойчивости V и VI в сторону возрастания числа выступов n на круге. Другими словами: по мере «засаливания» рабочей поверхности шлифовального инструмента необходимо для сохранения параметрической устойчивости упругой системы станка увеличивать число режущих выступов на круге. Понятно, что такое требование невозможно реализовать на практике. Остается только одно: для сохранения параметрической устойчивости упругой системы станка во времени необходимо не допускать снижения режущей способности круга, т.е. не допускать «засаливания» его рабочей поверхности. А это можно достигнуть или периодической правкой круга, или обеспечением условий самозатачиваемости рабочей поверхности инструмента. Последнее мероприятие является более предпочтительным, т.к. не ведет к снижению производительности.

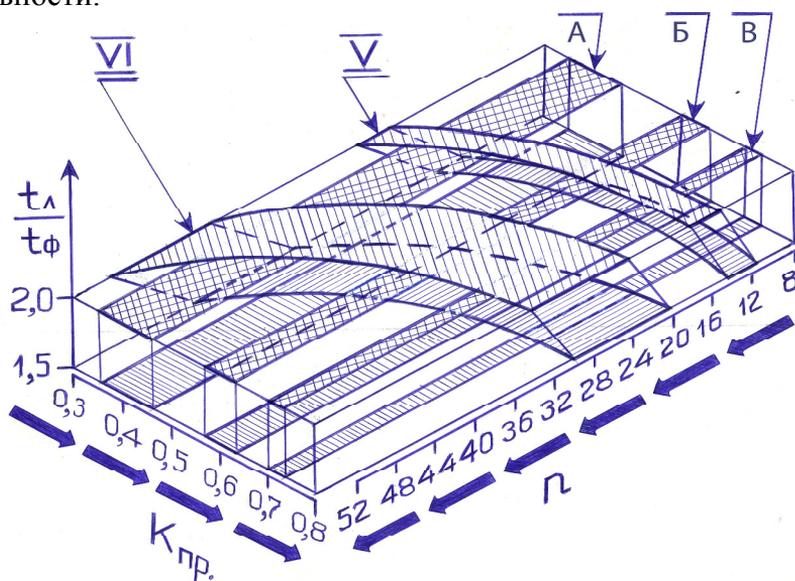


Рис. 10. Смещение криволинейных зон (V и VI) параметрической устойчивости упругой системы плоскошлифовального станка в сторону возрастания числа режущих выступов n на прерывистом круге при увеличении $\frac{t_l}{t_\phi}$ (т.е. при ухудшении режущей способности инструмента)

Снижение режущей способности прерывистого круга, т.е. увеличение величины отношения $\frac{t_d}{t_\phi}$, приводит к возрастанию размеров впадин за счет уменьшения длин режущих выступов (рис.6), что может спровоцировать возникновение параметрических колебаний.

Установлено [18], что обеспечить самообновление режущего микро-рельефа рабочей поверхности прерывистого шлифовального круга можно увеличением количества прорезей n при неизменной величине отношения их размеров к длинам выступов. Прерывистые круги с $40 \leq n \leq 60$ и $0,3 \leq K_{np} \leq 0,5$ имеют самообновляющийся микро-рельеф рабочей поверхности и долгое время сохраняют свою режущую способность [18]. Самозатачивание прерывистых шлифовальных кругов способствует формированию на их режущих выступах «заборных» поверхностей, коренным образом изменяющих механизм удаления режущими зернами обрабатываемого материала. Режущие зерна, расположенные в разных точках профиля «заборной» поверхности, находятся на разных расстояниях от центра вращения шлифовального круга и, перемещаясь по концентрическим окружностям, снимают металл тонкими слоями. При такой схеме удаления обрабатываемого материала уменьшается доля тепла, уходящая в деталь, и увеличивается доля тепла, поглощаемая стружкой, так как тепло, выделившееся от работы зерен и поглощенное деталью, не успевает проникать до уровня обработанной поверхности, т.к. зерна, расположенные на большем расстоянии от центра круга, срезают этот разогретый слой и тепло уходит в стружку [3].

Образование «заборных» поверхностей на режущих выступах прерывистого круга способствует увеличению площади контакта круга с обрабатываемым материалом и, следовательно, увеличивается количество зерен, активно участвующих в резании. На каждое зерно в этом случае нагрузка уменьшается и в зоне работы отдельных зерен выделяется меньшее количество тепла, так как объем работы, выполненный одним зерном, уменьшается. Все это приводит к снижению температуры в зоне резания. В работе [1] меньшая износостойкость алмазных прерывистых кругов (по сравнению со сплошными) рассматривается как положительное явление, способствующее обновлению их рабочей поверхности и устранению засаливания, в результате чего повышается технологическое время их работы и коэффициент полезного использования, так как отпадает необходимость их частой правки. Однако в работе [1] не принимается во внимание, что технологическое время работы круга складывается из времен чернового и чистового проходов, осуществляемых с различными глубинами резания. Прерывистый круг, хорошо зарекомендовавший себя на черновом проходе

шлифования, нельзя использовать на чистовом проходе, так как из-за наличия на режущих выступах «заборных» участков, сформированных на черновом проходе, величина отношения ширины впадины к длине выступа на чистовом проходе изменится, что приведет к параметрической неустойчивости упругой системы станка. В результате на чистовых проходах шлифования на обрабатываемых поверхностях будет формироваться волнистость, а работа круга будет сопровождаться катастрофическим износом. Поэтому для избегания появления в упругой системе станка нежелательных колебаний необходимо перед чистовыми проходами производить правку круга. При шлифовании прерывистыми кругами с наклонными пазами (рис.11) угол наклона «заборной» поверхности в 5 -10 раз меньше, чем при шлифовании кругами с прямыми пазами [3].



Рис. 11. Прерывистый круг с наклонными впадинами, обеспечивающими плавную работу режущих кромок

Для обеспечения плавной работы режущих кромок прорези на рабочей поверхности шлифовального инструмента рекомендуется изготавливать под углом β к оси круга [10] $\beta = \arctg \frac{l_2 + l_1}{B}$, где B – ширина круга. Такими кругами можно шлифовать как на черновых, так и на чистовых проходах.

Выводы.

1. Установлено, что окружную скорость круга $V_{кр}$ нельзя использовать в качестве управляющего параметра для улучшения самозатачиваемости рабочего микропрофиля шлифовального инструмента.
2. Установлено, что «заборная» поверхность режущего выступа прерывистого круга на чистовых проходах шлифования выступает в роли

дестабилизирующего фактора, способного вызвать параметрический резонанс упругой системе плоскошлифовального станка.

3. Установлено, что безрезонансную работу упругой системы станка можно обеспечить варьированием скоростью резания.

4. Обоснована возможность применения алмазных прерывистых кругов с наклонными прорезями на операциях шлифования износостойких плазменных покрытий и твердых сплавов с целью снижения теплонапряженности процесса шлифования.

Литература

1. Кигель, И.Г.. Исследование процесса шлифования твердых сплавов алмазными кругами с прерывистой рабочей поверхностью: дис. ... канд. техн. наук.: 05.02.08: Защищена 23.04.1971/Кигель Исаак Гершевич. – Пермь, 1971. – С.193.
2. Клименко, Н.Н. Повышение эксплуатационных характеристик деталей созданием износостойкого поверхностного слоя из плакированного карбида титана: дис. ... канд. техн. наук.: 05.02.08/Клименко Наталья Николаевна. – Одесса, 2003. – С.233.
3. Якимов, А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: «Машиностроение», 1975. – 176с.
4. Якимов, А.В. Абразивно – алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: «Машиностроение», 1984. – 312с.
5. Бояршинов, Ю.А.. Разработка и исследование способов повышения качества поверхностного слоя при шлифовании высокоточных зубчатых колес: дис. ... канд. техн. наук.: 05.02.08: Защищена 13.06.1970/Бояршинов Юрий Александрович. – Пермь, 1970. – С.220.
6. Матюха, П.Г. Определение оптимальных режимов при алмазном шлифовании твердых сплавов /П.Г. Матюха, В.Б. Стрелков, В.В. Полтавец //Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. трудов. – Краматорск: Изд-во ДГМА, 2006. – Вып.19. – С.50 – 57.
7. Усов, А.В. Влияние термомеханических явлений на трещинообразование при шлифовании материалов и сплавов, склонных к этому виду дефектов / А.В. Усов //Сучасні системи технологій у машинобудуванні: Зб.наук. пр.. – Одеса: ОНПУ, 2015. – С.105 – 119.
8. Усов, А.В. Исследование причин трещинообразования при шлифовании материалов и сплавов, склонных к этому виду дефектов / А.В. Усов //Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: Зб.наук. пр.. – Одеса: Наука і техніка, 2015. – С.119 – 135.
9. Новиков, Г.В. Определение условий повышения эффективности шлифования деталей с высокопрочными покрытиями. /Г.В. Новиков, В.А. Андилахай //Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2009. – С.72 – 78.
10. Лукин, Л.Л. Расчет прерывистых алмазных кругов при плоском периферийном шлифовании./Л.Л. Лукин, В.Д. Старшев //Вестник Иж.ГТУ. – 2007. - №1, - С.38. – 39.
11. Новиков, Г.В. Повышение эффективности алмазного шлифования деталей с высокопрочными покрытиями. /Г.В. Новиков, В.А. Андилахай, А.А. Машко, И.Н. Снисаренко //Вестник НТУ «ХПИ».. – 2009. – №2 – С.53 – 60.
- 12.Клименко, Н.Н., Лебедев В.Г., Чумаченко Т.В. Композиционные плазменные покрытия и их влияние на усталостные свойства стали // Материалы VI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ”Сварка и родственные технологии”.–Киев, 2011. – с. 92.

13. Лебедев, В.Г., Чумаченко Т.В., Клименко Н.Н. Разрушение пористых напыленных слоев из минералов и металлокерамики при шлифовании их кругами из синтетических сверхтвердых материалов силами резания // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". – Луцьк, 2011. – Випуск № 28. – С. 3-10.

14. Лебедев, В.Г., Клименко Н.Н. Некоторые соображения о механизме образования шлифовочных напряжений и трещин // Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків, 2011. – Випуск №81. – С. 3

15. Лебедев, В.Г. Улучшение качества поверхности при шлифовании напыленного слоя армированного карбидом /В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко//Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №1. – С. 144 – 148.

16. Якимов, А.А. Повышение эффективности процесса шлифования прерывистыми кругами из синтетических сверхтвердых материалов /А.А. Якимов, Л.В. Бовнегра, В.П. Кулик //Проблеми техніки: Науково – виробничий журнал. – 2015. №2. – С.73 – 85.

17. Якимов, А.А. Особенности прерывистого шлифования /А.А. Якимов, Л.В. Бовнегра //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: між нар. наук.-техн. журнал – Хмельницький: Хмельн. нац.ун-ет., – 2016. – №1(54).. – С.179 – 187.

18. Якимов, О.О. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару зубів високоточних зубчастих коліс при шліфуванні: Автореф. Дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08 /Одес. нац. політехн. ун-т. – Одеса, 2015. –50с.