

УДК621.9.06.-229.331

**А.А ЯКИМОВ**, д-р техн. наук, **В.М. ТОНКОНОГИЙ**, д-р техн. наук,  
**Л.В. БОВНЕГРА**, канд. техн. наук,  
**В.М. ТИГАРЕВ**, канд. техн. наук, Одесса, Україна

## **РАСПИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕРЫВИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ НА КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ**

Теоретично обґрунтована можливість мінімізації часових і матеріальних витрат на виготовлення переривистих кругів на керамічній в'язці за рахунок зменшення кількості западин з одночасним збільшенням коефіцієнта уривчастості. Запропонований склад твердого мастила, що наноситься на робочу поверхню переривистого круга, поліпшуючий шорсткість оброблюваної поверхні і що знижує температуру в зоні різання.

**Ключові слова:** виготовлення переривистих кругів, мінімізація витрат

Теоретически обоснована возможность минимизации временных и материальных затрат на изготовление прерывистых кругов на керамической связке за счет уменьшения количества западин с одновременным увеличением коэффициента прерывистости. Предложен состав твердой смазки, наносимой на рабочую поверхность прерывистого круга, улучшающий шероховатость обрабатываемой поверхности и снижающий температуру в зоне резания.

**Ключевые слова:** изготовление прерывистых кругов, минимизация затрат

The possibility of minimization time and material inputs on production of faltering circles on the ceramic sheaf due to reduction quantity of hollows with simultaneous increase in coefficient of intermittence is theoretically proved. The composition of the solid greasing applied on a working surface of a faltering circle, improving a roughness of the processed surface and reducing temperature in a cutting zone is offered.

**Keywords:** production of faltering circles, minimization time and material inputs

**Постановка проблеми.** Общеизвестны существенные преимущества шлифовальных кругов с прерывистой рабочей поверхностью, которые позволяют существенно понизить температуру в зоне резания и, как следствие, снизить вероятности появления прижогов и растягивающих напряжений в поверхностном слое шлифованных деталей. Однако такие круги в силу ряда причин находят весьма ограниченное применение. К факторам, сдерживающим широкое применение прерывистых кругов, относятся: повышенная шероховатость поверхности; колебания, под действием которых может ухудшиться макрогеометрия обработанной поверхности; сложность формирования западин на рабочей поверхности абразивного инструмента. Наибольшее распространение получило формирование западин на круге путем их прорезания на заточном станке. Однако этот способ малопроизводителен, материалоемкий и энергозатратен (рис. 1).

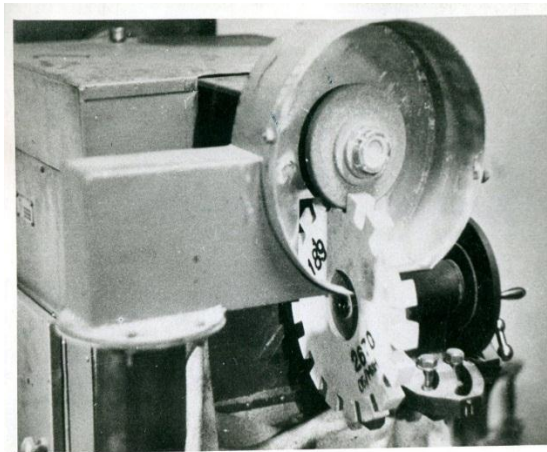


Рисунок 1 – Прорезание пазов на шлифовальном круге на заточном станке

Альтернативным решением является применение композиционных шлифовальных кругов, в которых прорезы заполняют в процессе их изготовления твердым смазочным материалом. Это решение позволяет транспортировать твердый смазочный материал непосредственно в зону шлифования и повысить динамическую устойчивость процесса шлифования. Но композиционные круги не могут в полной мере конкурировать с прерывистыми кругами, так как последние обладают высокой режущей способностью, связанной с возникновением в упругой системе станка высокочастотных колебаний, существенно улучшающих условия стружкообразования. Технология изготовления композиционных кругов имеет те же недостатки, что и технология изготовления прерывистых кругов. Паза прорезаются на заточных станках, оснащенных делительными устройствами. Технология изготовления прерывистых и композиционных кругов на керамической связке более производительным методом – прессованием не разработана.

**Цель работы.** Целью данной работы является найти пути расширения возможности применения прерывистого абразивного инструмента на керамической связке.

**Основные материалы исследования.** Параметрическая неустойчивость упругой системы станка при прерывистом шлифовании определяется условием [2]:

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

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

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

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

$\tau_1, \tau_2$  – времена прохождения над обрабатываемой поверхностью выступа и впадины прерывистого круга соответственно, с;  $t_a$  – глубина резания, установленная по лимбу, м;  $t_\phi$  – фактическая глубина резания, м;  $C_o$  – приведенная жесткость упругой системы станка, Н/м;  $h$  – величина, характеризующая угасание колебаний во времени, 1/с.

Для выявления влияния геометрических характеристик прерывистого круга на параметрическую устойчивость упругой системы станка были произведены соответствующие расчеты по формулам (1), (2), (3). Результаты расчетов приведены на рис. 2.

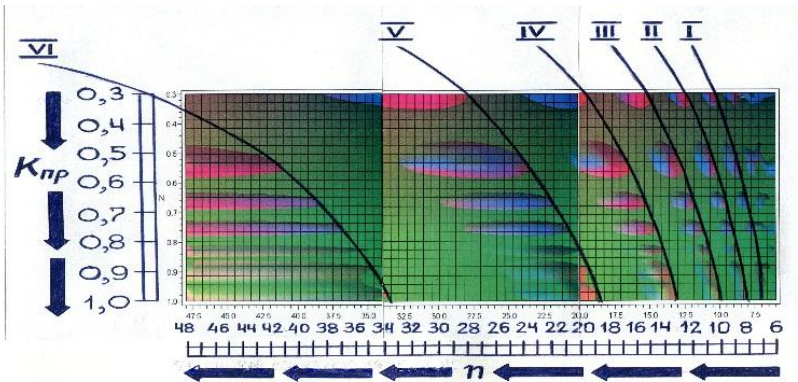


Рисунок 2 – Области параметрической неустойчивости упругой системы станка в виде эллипсов и границы зон устойчивой работы в виде кривых VI, V, IV, III, II, I. Расчеты произведены для  $t_n / t_\phi = 2$  (для неимпрегнированного круга)

На рис. 2 области параметрической неустойчивости упругой системы станка выглядят в виде эллипсных пятен, находящихся в плоской системе координат, в которой по оси абсцисс отложены количества прорезей на рабочей поверхности абразивного инструмента, а по оси ординат – величины отношений  $K_{np}$  ширины прорези  $l_2$  к длине режущего выступа  $l_1$ . Промежутки между пятнами – области, в которых не возникает параметрический резонанс. Кривые I, II, III, IV, V, VI – это правые границы этих областей (левые границы не показаны). Из характера кривых, очерчивающих области параметрической устойчивости, следует, что при увеличении коэффициента прерывистости  $K_{np} = l_2/l_1$  необходимо уменьшать количество прорезей на прерывистом круге  $n$ . Например, при увеличении коэффициента  $K_{np}$  от 0,3 до 1,0 количество прорезей  $n$  на круге уменьшается от 50 до 33 (рис.2, кривая VI). Уменьшение числа впадин на рабочей поверхности прерывистого абразивного инструмента приводит к снижению трудоемкости его изготовления.

На рис. 3 представлено семейство кривых, каждая точка которых является такой совокупностью коэффициента прерывистости  $K_{np}$  и числа прорезей  $n$ , при которой обеспечивается требуемая степень понижения температуры прерывистого шлифования по сравнению со сплошным [3].

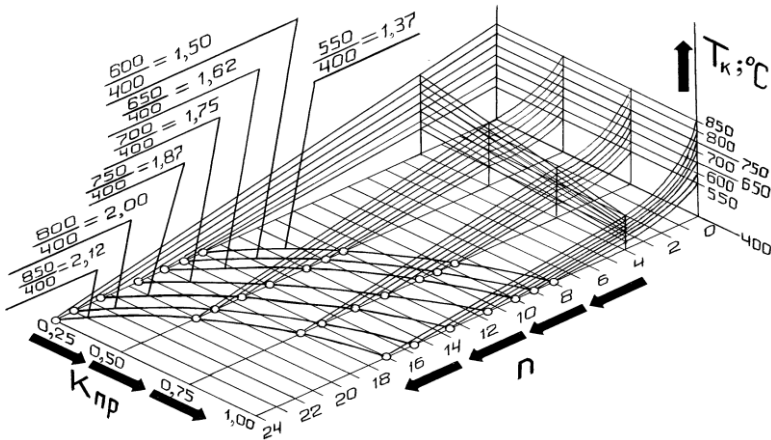


Рисунок 3 – Семейство кривых в координатной плоскости  $(k_{np}; n)$ , представляющих собой геометрические множества точек, каждая из которых является совокупностью геометрических характеристик  $(k_{np}; n)$  макрорельефа рабочей поверхности прерывистого шлифовального круга, обеспечивающих понижение температуры прерывистого шлифования до  $400^{\circ}\text{C}$  по сравнению с температурами сплошного шлифования  $850^{\circ}\text{C}$ ;  $800^{\circ}\text{C}$ ;  $750^{\circ}\text{C}$ ;  $700^{\circ}\text{C}$ ;  $650^{\circ}\text{C}$ ;  $600^{\circ}\text{C}$ ;  $550^{\circ}\text{C}$

Кривые из рис. 3 и кривые I, II, III, IV, V, VI (рис. 2) имеют одинаковый характер.

Из рис. 3 следует, что для снижения температуры сплошного шлифования от 550°C до 400°C за счет применения прерывистого круга необходимо, чтобы совокупность геометрических параметров его рабочей поверхности ( $K_{np}$  и  $n$ ) соответствовала точке на кривой, помеченной на

рисунке надписью:  $\frac{550}{400} = 1,37$ . Из анализа этой кривой следует, что для обеспечения требуемой степени понижения температуры необходимо при увеличении коэффициента прерывистости  $K_{np}$  от 0,25 до 1,00 уменьшить число впадин  $n$  от 16 до 8.

Из рис. 3 следует, что для обеспечения большей степени снижения температуры требуется увеличивать число прорезей на прерывистом круге. Известно [4], что при увеличении коэффициента прерывистости  $K_{np}$  увеличивается шероховатость обрабатываемой поверхности.

Обеспечить большую степень понижения температуры и улучшить шероховатость обработанной поверхности можно импрегнированием рабочей поверхности абразивного инструмента (с помощью карандашей твердой смазки) или импрегнированием всего шлифовального круга (т.е. насыщением пор инструмента специальными веществами, улучшающими его режущие свойства) [5-7].

Экспериментальные значения мощности  $N$ , затрачиваемой на резание, при шлифовании стали 48А обычным кругом ПП 250×20×76 24 А25 СМ26 К5 и кругом той же характеристики, импрегнированным контактным способом, на режиме  $V_{kp} = 35$  м/с;  $V_{зае} = 10$  м/мин;  $t = 0,02; 0,03; 0,04$  мм приведены в табл. [8].

Таблица

$t, \text{мм}$	$Bm$		$\frac{N_{умм.}}{N}$
	$N$	$N_{умм.}$	
0,02	220	150	0,682
0,03	350	250	0,714
0,04	650	450	0,692

Импрегнирование контактным способом осуществлялось прижимом брикета твердой смазки к рабочей поверхности вращающегося абразивного круга. Состав твердой смазки защищен авторским свидетельством [9]. Состав содержит следующие компоненты:

Стеариновая кислота.....	60-65%
Олеиновая кислота.....	20-25%
Ацетамид.....	Остальное

Из табл. видно, что шлифование импрегнированным кругом протекает с меньшими энергозатратами по сравнению со шлифованием обычным кругом. Известно [5-7], что импрегнирование шлифовальных кругов существенно улучшает их режущую способность. Режущая способность абразивного круга может быть оценена величиной отношения глубины резания, установленной по лимбу станка  $t_n$ , к фактической глубине резания  $t_\phi$ . Чем меньше величина этого отношения отличается от единицы, тем лучше режущая способность абразивного круга. Оценку влияния величины отношения  $t_n/t_\phi$  на параметрическую устойчивость упругой системы станка можно провести, сопоставляя рис. 2 и 4.

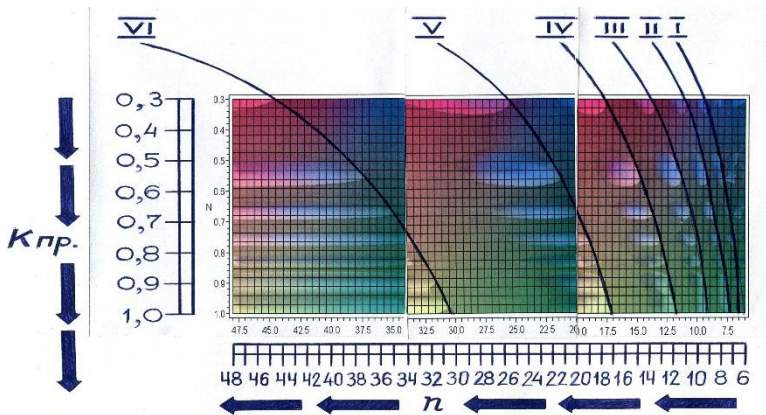


Рисунок 4 – Области параметрической неустойчивости упругой системы станка в виде эллипсов и границы зон устойчивой работы в виде кривых V1, V, IV, III, II, I.

Расчеты произведены для  $t_n/t_\phi = 1,5$

(для круга, на рабочую поверхность которого нанесена твердая смазка)

На рис. 2 и рис. 4 границы зон устойчивой работы (кривые V1, V, IV, III, II, I) представляют собой геометрическое множество точек, каждая из которых является совокупностью геометрических характеристик ( $K_{пр}, n$ ) макрорельефа рабочей поверхности прерывистого круга.

Из сопоставления рис. 2 и рис. 4 следует, что за счет нанесения на рабочую поверхность круга твердой смазки (т.е. за счет уменьшения величины отношения  $t_n/t_\phi$ ) можно добиться смещения границ зон устойчивой работы упругой системы станка в сторону уменьшения количества впадин на прерывистом круге. Уменьшение числа прорезей на

абразивном инструменте приводит к снижению временных и материальных затрат на изготовление прерывистых кругов.

Известно [5], что при жидкостной пропитке абразивных кругов их объемная плотность и масса увеличиваются в зависимости от марки импрегнатора от 5 до 30%. На рис. 5 [5] показано изменение объемной плотности кругов после их жидкостного импрегнирования радонидом аммония РА (2), раствором хлорсульфидного полиэтилена ХСПЭ в растворе толуола (3), латексом марки ДММА (4), многофункциональной присадкой Л326 (5), серой кристаллической в расплаве (6).

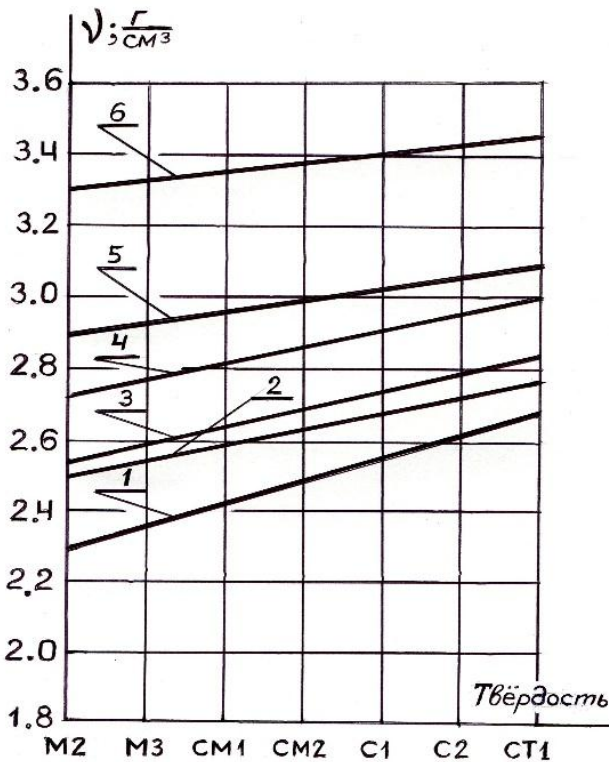


Рисунок 5 – Изменение плотности кругов после импрегнирования:  
1) круг не импрегнирован; 2) РА; 3) ХСПЭ; 4) ДММА; 5) Л326; 6) Сера

Сопоставление рис. 6 и рис. 4 дает возможность выяснить характер изменения параметрической неустойчивости упругой системы станка при увеличении массы шлифовального круга на 30%.

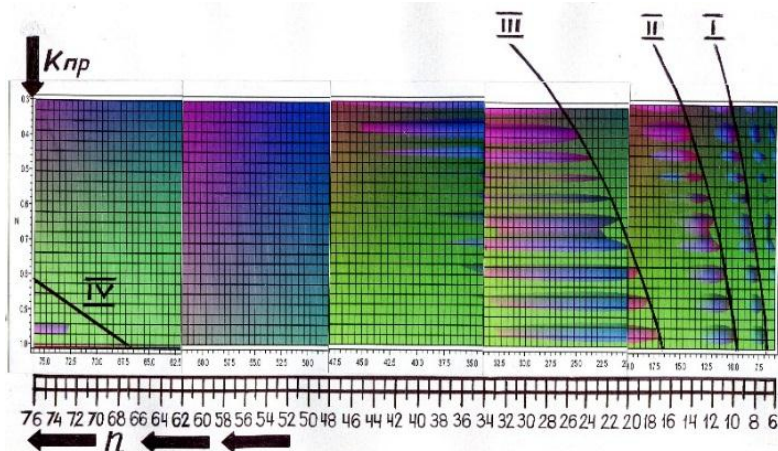


Рисунок 6 – Параметрическая неустойчивость упругой системы станка при шлифовании прерывистыми кругами после их жидкостного импрегнирования кристаллической серой в расплаве

При работе прерывистых кругов, на рабочие поверхности которых нанесена твердая связка, в районе относительно малых чисел впадин ( $6 \leq n \leq 35$ ) можно выделить две зоны устойчивой работы упругой системы станка: правее кривой VI и правее кривой V (рис. 4).

При работе прерывистых кругов, жидкостно импрегнированных кристаллической серой, в районе относительно малых чисел впадин ( $6 \leq n \leq 35$ ) просматривается только одна зона устойчивой работы упругой системы станка: правее кривой III (рис.6), зато в районе больших чисел впадин ( $35 \leq n \leq 72$ ) – сплошная устойчивая зона. Это говорит о том, что прерывистые круги с малым числом прорезей ( $6 \leq n \leq 35$ ) пропитывать не рекомендуется. А работа импрегнированных кругов с большим числом впадин ( $35 \leq n \leq 72$ ) – не сопровождается параметрическим резонансом, но изготовление этих инструментов связано с большими временными и материальными затратами.

Использование серы в качестве жидкого импрегнатора имеет ряд недостатков. Сера характеризуется высокой вязкостью и пониженной жидкотекучестью. Поэтому для уменьшения неравномерности заполнения серой пор по объему абразивного инструмента необходимо пропитку осуществлять в вакууме с последующей подачей давления, а это требует специального дорогостоящего оборудования и специальных производственных площадей. Кроме того, даже используя вакуумную



установку величина дисбаланса кругов после пропитки серой в три раза превышает величину дисбаланса до пропитки [5].

Кроме того, в процессе шлифования кругами, пропитанными серой, выделяется неприятный запах, что ухудшает экологичность на рабочем месте.

Способ нанесения на рабочую поверхность круга твердой смазки непосредственно в процессе шлифования достаточно прост в реализации, а использование состава твердой связки [9] при шлифовании прерывистыми кругами с малым числом впадин позволяет сократить время и затраты на их прорезание.

Из сопоставления графических данных, приведенных на рис. 2 (не импрегнированный круг), рис. 4 (круг с нанесенной на его рабочую поверхность твердой смазкой) и рис. 6 (импрегнированный круг с увеличенной массой) следует, что нанесение твердой смазки на рабочую поверхность абразивного инструмента приводит к смещению областей параметрической неустойчивости (эллипсоподобных пятен) и зон устойчивой работы упругой системы станка (промежутков между эллипсами) в сторону уменьшения числа прорезей на прерывистом круге. При этом размеры этих областей (эллипсов) и зон (промежутков между ними) остаются неизменными. Увеличение массы шлифовального круга, произошедшее из-за его импрегнирования, приводит к растягиванию как эллипсов, так и промежутков между ними в направлении увеличения числа прорезей на рабочей поверхности инструмента. Причем с увеличением числа впадин величина растяжения возрастает. Например, районы, ограниченные кривыми I и II, II и III, III и IV растянулись соответственно в 2,7 раза, в 4,2 раза и в 9,3 раза соответственно.

### **Выводы**

1. Установлено, что с увеличением количества прорезей на рабочей поверхности абразивного инструмента увеличиваются размеры зон параметрической устойчивости упругой системы станка и возрастает степень понижения температуры прерывистого шлифования по сравнению со сплошным.

2. Установлено, что зоны параметрической устойчивости упругой системы станка и линии, соответствующие совокупностям чисел прорезей и коэффициентов прерывистости, обеспечивающим одинаковую степень снижения температуры прерывистого шлифования по сравнению со сплошным, имеют одну и ту же искривленность, что позволяет при проектировании прерывистых кругов уменьшать число прорезей с одновременным повышением величины отношения ширины впадины к длине режущего выступа. Уменьшение количества прорезей приводит к уменьшению временных затрат на изготовление прерывистых кругов и на снижение затрат на инструмент, с помощью которого осуществляется формирование впадин.

3. Установлено, что повышение шероховатости обработанной поверхности, связанное с увеличением коэффициента прерывистости, можно

компенсировать нанесением на рабочую поверхность круга твердой смазки, в состав которой входят: стеариновая кислота (60 - 65%), олеиновая кислота (20 - 25%), ацетамида (остальное). Применение твердой смазки указанного состава не только улучшает шероховатость обработанной поверхности, но и снижает температуру в зоне резания.

**Список использованных источников:** 1. Худобин, Л.В. Шлифование композиционными кругами / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 256 с. 2. Якимов, А.А. Повышение эффективности процесса шлифования прерывистыми кругами из синтетических сверхтвердых материалов / А.А. Якимов, Л.В. Бовнегра, В.П. Кулик // Проблемы техники: Наук.-виробн. журнал. – Одеса: ОНМУ. 2015. – №2. – С.7-85. 3. Якимов, А.А. Определение температуры, возникающей при зубошлифовании прерывистыми кругами на станках МААГ, 5851, 5853, работающей по нулевой схеме / А.А. Якимов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2014. – Вып. 84. – С. 236-244. 4. Якимов, О.О. Вплив числа ріжучих виступів на переривчастому шліфувальному крузі на параметричну стійкість пружної системи верстата і на шорсткість обробленої поверхні / О.О. Якимов, С.М. Умінський, С.Ю. Дмитрієва // Аграрний вісник Причорномор'я: збірник наукових праць, Технічні науки. – Одеса: ОДАУ. 2014. – Вип.74. – С.139-144. 5. Никитин, А.В. Шлифование труднообрабатываемых материалов импрегнированными кругами как способ повышения их режущих свойств / А.В. Никитин // Инструмент и технологии. – 2010. – №28. – Вып. 2 – С.52-58. 6. Чирков, Г.В. Влияние импрегнирования шлифовального круга на качество обработки / Г.В. Чирков // Технология машиностроения. – 2007. – №2. – С.22-23. 7. Чирков, Г.В. Исследование поверхностного слоя стали 45 при обработке импрегнированным инструментом / Г.В. Чирков // Технология машиностроения. – 2006. – №12. – С.45 -46. 8. Якимов, А.А. Технологические основы обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при шлифовании зубчатых колес / А.А. Якимов. – Одесса: Астропринт, 2003. –456 с. 9. Якимов, О.О. Масло для механічної обробки металів / О.О. Якимов, В.І. Вінникова / Патент 9586 Україна, С10М133/56; №93111448; Заява 31.12.92; Опубл. 26.02.99. Бюл. №1. – 4 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Hudobin, L.V. Shlifovanie kompozicionnymi krugami / L.V. Hudobin, N.I. Vetkasov. – Ulanovsk: UlGTU, 2004. – 256 s. 2. Jakimov, A.A. Povyshenie jeffektivnosti processa shlifovanija preryvistymi krugami iz sinteticheskikh sverhtverdyh materialov / A.A. Jakimov, L.V. Bovnegra, – V.P. Kulik // Problemi tehniki: Nauk.-virobn. zhurnal. – Odesa: ONMU. 2015. – No 2. – S.7-85. 3. Jakimov, A.A. Opredelenie temperatury, vznikajushhej pri zuboshlifovanii preryvistymi krugami na stankah MAAG, 5851, 5853, rabotajushhij po nulevoj sheme / A.A. Jakimov // Rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: NTU «HPI». 2014. – Vyp. 84. – S.236 – 244. 4. Jakimov, O.O. Vpliv chisla rizhuchih vistupiv na pererivchastomu shlifoval'nomu kruzi na parametricnu stijkist' pruzhnoj sistemi verstata i na shorstkist' obroblenoj poverhni / O.O. Jakimov, S.M. Umins'kij, S.Ju. Dmitrieva // Agrarnij visnik Prichornomor'ja: sbirnik naukovih prac', Tehnichni nauki. – ODAU. 2014. – Vip.74. – S.139 -144. 5. Nikitin, A.V. Shlifovanie trudnoobratyvaemyh materialov impregnirovannymi krugami kak sposob povyshenija ih rezhuschih svojstv / A.V. Nikitin // Instrument i tehnologii. – 2010. – №28. – Vyp.2 – S.52-58. 6. Chirkov, G.V. Vlijanie impregnirovaniya shlifoval'nogo kruga na kachestvo obrabotki / G.V. Chirkov // Tehnologija mashinostroenija. – 2007. – №2. – S.22 -23. 7. Chirkov, G.V. Issledovanie poverhnostnogo sloja stali 45 pri obrabotke impregnirovannym instrumentom / G.V. Chirkov // Tehnologija mashinostroenija. – 2006. – №12. – S.45-46. 8. Jakimov, A.A. Tehnologicheskie osnovy obespechenija i stabilizacii kachestva poverhnostnogo sloja pri shlifovanii zubchatyh kolos / A.A. Jakimov. – Odesa: Astroprint, 2003. – 456 s. 9. Jakimov, O.O. Mastilo dlja mehanichnoj obrobki metaliv / O.O. Jakimov, V.I. Vinnikova / Patent 9586 Ukraina, S10M133/56; №93111448; Zajava 31.12.92; Opubl. 26.02.99. Bjul. №1. – 4 s.