

УДК 621.9.06-229.331

В.М. ТОНКОНОГИЙ, д-р техн. наук,

С.Ю. ДМИТРИЕВА,

А.А. ЯКИМОВ, канд. техн. наук, Одесса, Україна

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В УСЛОВИЯХ
ШЛИФОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС
ПРЕРЫВИСТЫМИ ЭЛЬБОРОВЫМИ КРУГАМИ**

У роботі теоретично обґрунтовано можливість запобігання явищ параметричного резонансу при зубошліфування переривчастими тарілчастими колами за нульовою схемою за рахунок застосування ельборових кіл і розрахунку геометричних параметрів макрорельєфа їх робочої поверхні.

В работе теоретически обоснована возможность предотвращения явлений параметрического резонанса при зубошлифовании прерывистыми тарельчатыми кругами по нулевой схеме за счет применения эльборовых кругов и расчета геометрических параметров макрорельефа их рабочей поверхности.

The paper theoretically proved possible to prevent parametric resonance phenomena in gear grinding broken mop disc zero scheme by applying cbn wheel and calculation of geometrical parameters macrorelief their work surface.

1. Постановка проблемы и анализ последних публикаций. Одним из путей повышения производительности шлифования является применение кругов из кубического нитрида бора (КНБ, эльбора). Режущая способность этих кругов на 20-30% больше, чем электрокорундовых кругов [9]. Применение кругов из КНБ позволяет повысить производительность обработки в полтора раза по сравнению со шлифованием абразивными кругами [14]. Исследования, направленные на повышение производительности операции шлифования путем применения кругов из КНБ, выполнены в работах [1] ÷ [19]. Исследования, связанные с использованием кругов из КНБ на операциях зубошлифования, проведены в работах [2, 3, 13, 14, 17, 18].

Особо актуальным является применение кругов из КНБ при обработке на станках МААГ, 5851, 5853 тарельчатыми кругами по нулевой схеме, т.к. из всех существующих схем зубошлифования эта схема обеспечивает наибольшую точность обработки, но является наименее производительной. Меньший размерный износ кругов из КНБ по сравнению с абразивными кругами позволяет отказаться от механизма компенсации износа при шлифовании по этой схеме [2,3,17,18]. Отрицательным фактором, сдерживающим применение тарельчатых кругов из КНБ на операции шлифования по нулевой схеме, является невозможность эффективно осуществлять обработку «всухую» (без применения СОЖ), следствием чего является, в ряде случаев, образование прижогов на шлифуемых поверхностях. Возможность осуществлять зубошлифование «всухую» достигается применением кругов из КНБ с торговым названием АЭРОБОР, выпускаемых Абразивным заводом «Ильич» (С.-Петербург, Россия). Особенностью этих кругов является увеличение размеров и количество пор, что способствует лучшему размещению стружки, меньшей засаливаемости рабочей поверхности инструмента и, как следствие, снижению теплонапряженности процесса шлифования [1]. Однако применение кругов торговой марки АЭРОБОР не снимает в полной мере проблему снижения теплонапряженности при зубошлифовании тарельчатыми кругами по нулевой схеме. Известно, что эффективным путем снижения теплонапряженности процесса шлифования является применение кругов с прерывистой рабочей поверхностью. Однако известны случаи, когда при прерывистом шлифовании развивались значительные колебания упругой системы станка, приводящие к повышению шероховатости обработанной поверхности и к появлению на ней циклических прижогов (рис.1).

Это объясняется тем, что периодичность изменения контакта инструмента с деталью в условиях прерывистого шлифования приводит к периодическому изменению жесткости упругой системы станка. В связи с этим актуальной является проблема предотвращения появления параметрической неустойчивости упругой системы станка при зубошлифовании прерывистыми тарельчатыми кругами из КНБ по нулевой схеме.

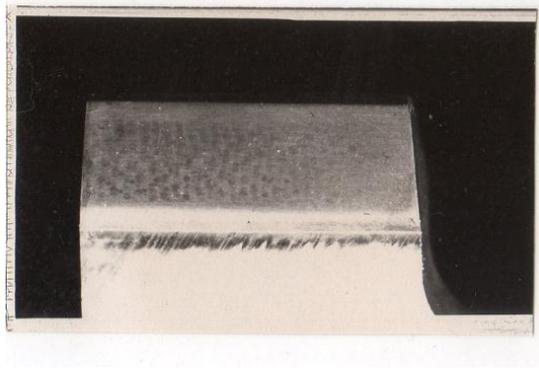


Рисунок 1 – Внешний вид цилиндрических прижогов на рабочей поверхности зуба, образованных из-за неустойчивой работы упругой системы шлифовального станка

2. Цель исследования. Целью настоящей работы является предотвращение появления параметрического резонанса при зубошлифовании тарельчатыми эльборовыми прерывистыми кругами по нулевой схеме на станках МААГ, 5851, 5853.

3. Основные результаты исследования. В работе [20] получено условие параметрической неустойчивости упругой системы зубошлифовального станка, работающего тарельчатыми прерывистыми кругами по нулевой схеме:

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

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.

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

где t_l , t_ϕ – глубина резания, установленная по лимбу и фактическая глубина резания соответственно, м;

C_0 – приведенная жесткость упругой системы, $\frac{H}{м}$;

m – приведенная масса, $\frac{H \cdot сек^2}{м}$;

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

На рис. 2 приведены расчетные зависимости левой и правой частей условия неустойчивости (1) от количества прорезей на шлифовальном круге и от величины отношения ширины впадины к длине режущего выступа.

Зависимость $L = f(n;N)$ выглядит в виде волнообразной поверхности, а зависимость $\frac{1+M}{2} = f(n, N)$ – в виде плоской поверхности. Эллипсообразные линии пересечения этих поверхностей являются границами областей, содержащих совокупности геометрических параметров макрорельефа рабочей поверхности прерывистого шлифовального круга, при которых возникает параметрическая неустойчивость упругой системы станка. Расчеты проводились для различных значений приведенной массы шлифовального круга.

Из рис. 2 видно, что на параметрическую устойчивость упругой системы станка сильное влияние оказывают приведенная масса шлифовального круга, количество прорезей на его рабочей поверхности и величина отношения ширины впадины к длине режущего выступа.

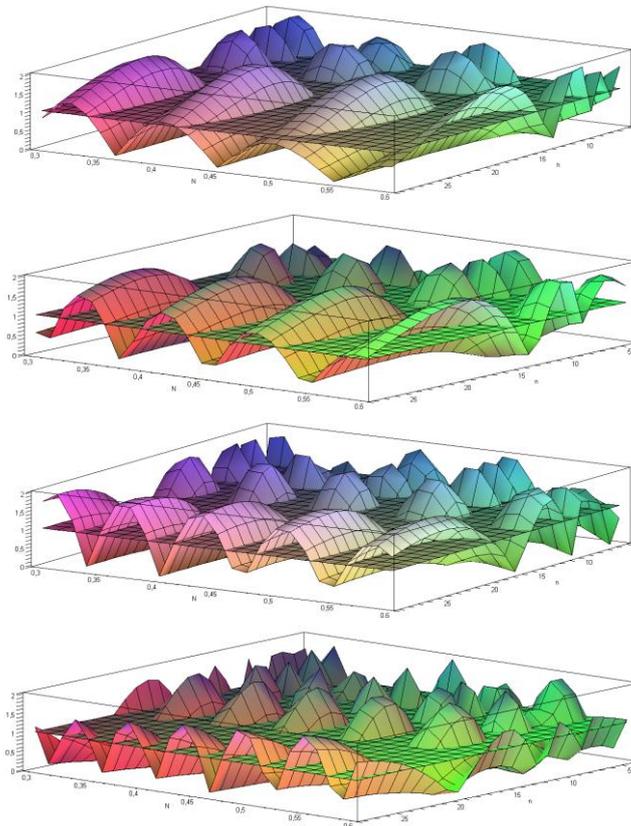


Рисунок 2 – Влияние приведенной массы круга m на параметрическую устойчивость упругой системы станка:
 $m = 0,452; 0,352; 0,252; 0,152 \frac{H \cdot \text{сек}^2}{M}$ соответственно (сверху вниз)

На рис. 3 показаны области неустойчивой работы упругой системы станка, построенные в плоской системе координат, в которой по осям абсцисс отложены значения отношений длин впадин к длинам режущих выступов ($N = l_2/l_1$), а по осям ординат – число режущих выступов на шлифовальном круге n . Расчеты областей произведены для различных значений приведенной массы шлифовального круга m .

Из рис. 3 видно, что при уменьшении приведенной массы m области неустойчивой работы упругой системы станка смещаются в сторону увеличения числа режущих выступов на круге. Уменьшение приведенной массы прерывистого инструмента приводит к сужению границ областей неустойчивой работы упругой системы станка в направлении, параллельном оси абсцисс, и к сближению областей, т.е. к уменьшению расстояний между соседними областями.

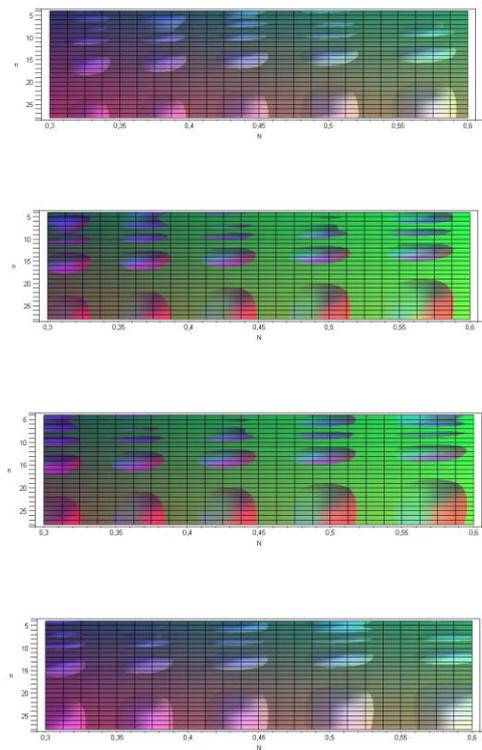


Рисунок 3 – Овально-подобные границы областей, включающих в себя такие сочетания чисел впадин и отношений их длин к длинам выступов, при которых наблюдается неустойчивая работа упругой системы шлифовального станка. Расчеты произведены для приведенных масс кругов $m = 0,152; 0,172; 0,192; 0,212; 0,232; 0,252 \frac{H \cdot сек^2}{M}$ соответственно (сверху вниз)

На рис. 4 показаны заштрихованные области, соответствующие устойчивым состояниям упругой системы станка. Эти области включают в себя в совокупности значений отношения ширины впадины к протяженности выступа и динамической жесткости резания K_0 .

$$K_0 = C_0 \cdot \left(\frac{t_l}{t_\phi} - 1 \right)$$

Из рис. 4 видно, что увеличение жесткости резания (т.е. потеря кругом режущей способности) приводит к сужению областей устойчивой работы упругой системы шлифовального станка.

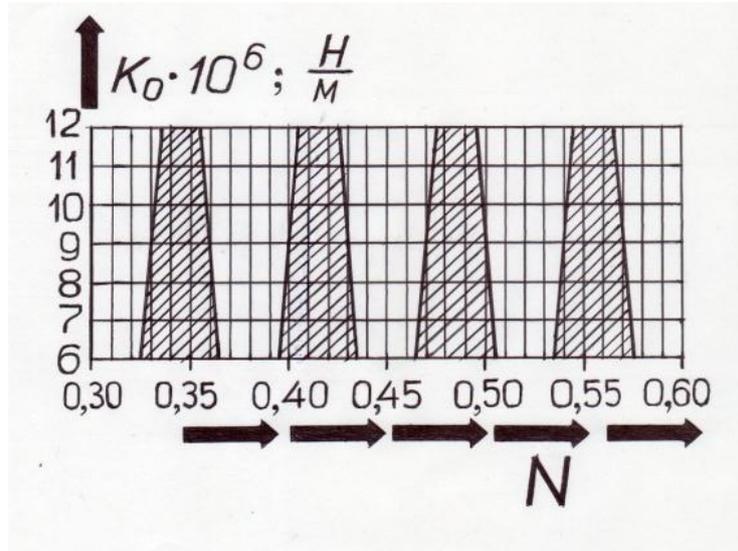


Рисунок 4 – Заштрихованні області, відповідуючі устійливим
состоянням упругої системи станка, для $m = 0,252 \frac{H \cdot \text{сек}^2}{M}$ $4 \leq n \leq 28$

Из рис. 2,3,4 видно, что параметрическая устійчивость упругой системы станка зависит от массы и режущей способности шлифовального круга, от числа впадин на его рабочей поверхности и от величины отношения ширины впадины l_2 к длине выступа l_1 .

При эксплуатации абразивного инструмента происходит уменьшение его диаметра (в следствие износа и периодических правок круга) и режущей способности (в следствие засаливаемости рабочей поверхности круга). Уменьшение диаметра круга приводит к уменьшению его массы и к возрастанию величины отношения ширины впадины l_2 к протяженности режущего выступа l_1 (в следствие уменьшения l_1 и неизменности l_2). Все эти изменения приводят к нарушению параметрической устійчивости упругой системы шлифовального станка. Применение прерывистых кругов из КНБ позволит сохранить параметрическую устійчивость упругой системы, т.к. режущая способность этих кругов на 25-30% больше, а размерный износ в 3 раза меньше, чем абразивных [14].

Вывод. Теоретически обосновано применение тарельчатых эльборовых кругов на операции прерывистого зубошлифования на станках МААГ, 5851, 5853 по нулевой схеме с позиции предотвращения явлений параметрического резонанса.

Список использованных источников: 1. *Кремень З.И.* АЭРОБОРТМ – новое поколение кругов из эльбора – КНБ на керамической связке // инструмент и технологии. – 2003. – №15-16. – с. 50-57. 2. *Рябченко С.В.* Разработка технологии шлифования зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ // Сучасні процеси механічної обробки інструментами із НТМ та якість поверхні деталей машин: Зб. наук. праць (серія Г «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти») НАН України. ІНМ ім. В.М. Бакуля. – Київ, 2006. – с. 161-168. 3. *Рябченко С.В.* Повышение эффективности шлифования высокоточных зубчатых колес кругами из КНБ // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Зб. наук. праць. – Краматорськ: ізд-во ДГМА, 2008. Вип. 23. – с. 95-101. 4. *Лавриненко В.И., Смоквина В.В., Солод В.Ю.* Особенности морфологии порошков из кубического нитрида бора и их направленное использование в шлифовальном инструменте. // Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Вип. 8. – Харків: НТУ «ХПИ», 2013. – с. 56-65. 5. *Carius Alan.* CBN Abrasives and the Grindability of Powder Metal Materials // Gohram conferences: Precision Grinding & Finishing in the Global Economy – 2001, Chicago, October, 1-3, 2001. 6. *Аль-Аджейлат С.А., Лебедев В.Г., Усов А.В.* Объем металла, удаляемого зерном КНБ, при шлифовании закаленной стали. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – Вип. 68 – с.51-54. 7. *Серов Б.С.* Качество обработки при круглом наружном эльборовом шлифовании быстрорежущих инструментов // Вісник інженерної академії України (спец. випуск). – Київ: 2000. – с.263-268. 8. *Худобин Л.В., Унянин А.Н.* Эльборовое шлифование заготовок из труднообрабатываемых материалов с ультразвуковой гидроочисткой круга // Вісник інженерної академії України – Київ: 2001. – №3 (Частина 1) – с.196-203. 9. *Серов Б.С.* Производительность процесса эльборового шлифования быстрорежущей стали // Авиационно-космическая техника и технология. Труды государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков: ГАУ «ХАИ», 2000. – Вип. 14 – с.350-352. 10. *Аль-Аджейлат С.А., Лебедев В.Г., Усов А.В.* Аналитическое определение сил и температур резания единичным эльборовым зерном // Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка – Харків: ХНТУСГ, 2009. – Вип. 81 – с.263-270. 11. *Кремень З.И.* Анализ возможностей управления пористостью шлифовальных кругов из эльбора с целью расширения областей их применения // З.И. Кремень, А.И. Лебедев // Инструмент и технологии. – 2010. – №27. – Вып.1 – с.46-49. 12. *Кремень З.И.* Шлифовальные круги из эльбора – новый уровень эксплуатационных свойств // Инструмент и технологии. – 2003. – №11-12. – с.175-180. 13. *Поклад В.А.* Производственные испытания высокопористого эльборового круга при профильном шлифовании зубчатых колес / В.А. Поклад, В.С. Новиков, Ю.И. Жуков, В.К. Старков, С.А. Рябцев // Технология машиностроения. – 2006. - №5. – с.27-31. 14. *Старков В.К.* Сравнительный анализ работоспособности высокопористых эльборовых и корундовых

кругов при профільному зубшлифованні / В.К. Старков, С.А. Рябцев, В.А. Поклад, В.С. Новиков, М. Кайзер, С.В. Костров // Технологія машиностроєння. – 2007. – №2. – с.17-22. **15.** *Старков В.К.* Структурное моделирование рецептурных составов шлифовальных кругов из кубического нитрида бора / В.К. Старков, С.А. Рябцев, Л.С. Петросян // Вестник МГТУ «Станкин». – 2009. - №1. – с.87-97. **16.** *Чумаченко Т.В.* Фактическое расстояние между режущими зернами в эльборовом круге / Т.В. Чумаченко, В.Г. Лебедев // Проблемы техники: научно-производственный журнал. – 2009. - №2. – с.124-134. **17.** *Рябченко С.В.* Износ кругов из СТМ при зубшлифовании. // Породорасширяющий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения – 2010. – Вып. 13 – с.495-500. **18.** *Рябченко С.В.* Шлифование зубчатых колес тарельчатыми кругами // Оборудование и инструмент для профессионалов. – Харьков: ООИИД «Центр информ», 2014. - №2 – с.44-48. **19.** *Z.I. Kremen.* A new generation of high-porous vitrified CBN wheels, IDR, 2003, №4, p.p.53-56. **20.** *Якимов А.А.* Условие параметрической неустойчивости упругой системы станка при шлифовании кругами с прерывистой рабочей поверхностью // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП», 2013. – Вип.8 – с.201-210.

Bibliography (transliterated): **1.** *Kremen' Z.I.* AJeROBORTM – novoe pokolenie krugov iz jel'bora – KNB na keramicheskoj svjazke // instrument i tehnologii. – 2003. – №15-16.– s.50-57. **2.** *Rjabchenko S.V.* Razrabotka tehnologii shlifovanija zubchatyh koles tarel'chatymi krugami iz STM // Suchasni procesi mehanichnoї obrobki instrumentami iz NTM ta jakist' poverhni detalej mashin: Zb. nauk. prac' (serija G «Procesi mehanichnoї obrobki, verstati ta instrumenti») NAN Ukraїni. INM im. V.M. Bakulja. – Kiїv, 2006. – s.161-168. **3.** *Rjabchenko S.V.* Povyshenie jeffektivnosti shlifovanija vysokotochnyh zubchatih koles krugami iz KNB // Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem: Zb. nauk. prac'. – Kramators'k: izd-vo DGMA, 2008. Vip. 23. – s.95-101. **4.** *Lavrinenko V.I., Smokvina V.V., Solod V.Ju.* Osobennosti morfologii poroshkov iz kubicheskogo nitrída bora i ih napravlennoe ispol'zovanie v shlifoval'nom instrumente. // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: Zb. nauk. prac'. – Vip. 8. – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – s.56-65. **5.** *Carius Alan.* CBN Abrasives and the Grindability of Powder Metal Materials // Gohram conferences: Precision Grinding & Finishing in the Global Economy – 2001, Chicago, October, 1-3, 2001. **6.** *Al'-Adzhejlat S.A., Lebedev V.G., Usov A.V.* Ob#em metalla, udaljaemogo zernom KNB, pri shlifovanii zakalenoj stali. // Visnik Harkiv'skogo nacional'nogo tehničnogo universitetu sil's'kogo gospodarstva im. Petra Vasilenka. – Harkiv: HNTUSG, 2008. – Vip. 68 – s.51-54. **7.** *Serov B.S.* Kachestvo obrabotki pri kruglom naruzhnom jel'borovom shlifovanii bystrorezhushhijh instrumentov // Visnik inženernoї akademii Ukraїni (spec. vipusk). – Kiїv: 2000. – s. 263-268. **8.** *Hudobin L.V., Unjanin A.N.* Jel'borovoe shlifovanie zagotovok iz trudnoobrabatyvaemyh materialov s ul'trazvukovoj gidroochistkoj kruga // Visnik inženernoї akademii Ukraїni – Kiїv: 2001. – №3 (Chastina 1) – s.196-203. **9.** *Serov B.S.* Proizvoditel'nost' processa jel'borovogo shlifovanija

bystrorezhushhej stali // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. Trudy gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta im. N.E. Zhukovskogo «HAI». – Har'kov: GAU «HAI», 2000. – Vip. 14 – s.350-352. **10.** Al'-Adzhejlat S.A., Lebedev V.G., Usov A.V. Analiticheskoe opredelenie sil i temperatur rezanija edinichnym jel'borovym zernom // Visnik harkivs'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu sil'skogo gospodarstva im. Petra Vasilenka – Harkiv: HNTUSG, 2009. – Vip. 81 – s.263-270. **11.** Kremen' Z.I. Analiz vozmožnostej upravljenija poristost'ju shlifoval'nyh krugov iz jel'bora s cel'ju rasshirenija oblastej ih primenenija // Z.I. Kremen', A.I. Lebedev // Instrument i tehnologii. – 2010. – №27. – Vyp.1 – s.46-49. **12.** Kremen' Z.I. Shlifoval'nye krugi iz jel'bora – novyj uroven' jekspluatacionnyh svojstv // Instrument i tehnologii. – 2003. – №11-12. – s. 175-180. **13.** Poklad V.A. Proizvodstvennye ispytaniya vysokoporistogo jel'borovogo kruga pri profil'nom shlifovanii zubchatyh koles / V.A. Poklad, V.S. Novikov, Ju.I. Zhukov, V.K. Starkov, S.A. Rjabcev // Tehnologija mashinostroenija. – 2006. - №5. – s.27-31. **14.** Starkov V.K. Sravnitel'nyj analiz rabotosposobnosti vysokoporistyh jel'borovyh i korundovyh krugov pri profil'nom zuboshlifovanii / V.K. Starkov, S.A. Rjabcev, V.A. Poklad, V.S. Novikov, M. Kajzer, S.V. Kostrov // Tehnologija mashinostroenija. – 2007. – №2. – s.17-22. **15.** Starkov V.K. Strukturnoe modelirovanie recepturnyh sostavov shlifoval'nyh krugov iz kubicheskogo nitrída bora / V.K. Starkov, S.A. Rjabcev, L.S. Petrosjan // Vestnik MGTU «Stankin». – 2009. – №1. – s.87-97. **16.** Chumachenko T.V. Fakticheskoe rasstojanie mezhdu rezhushhimi zernami v jel'borovom kruge / T.V. Chumachenko, V.G. Lebedev // Problemy tehniki: nauchno-proizvodstvennyj zhurnal. – 2009. – №2. – s.124-134. **17.** Rjabchenko S.V. Iznos krugov iz STM pri zuboshlifovanii. // Porodorasshirjajushhij i metalloobratyvajushhij instrument – tehnika i tehnologija ego izgotovlenija i primenenija – 2010. – Vyp. 13 – s.495-500. **18.** Rjabchenko S.V. Shlifovanie zubchatyh koles tarel'chatymi krugami // Oborudovanie i instrument dlja professionalov. – Har'kov: OOOIID «Centr inform», 2014. – №2 – s.44-48. **19.** Z.I. Kremen. A new generation of high-porous vitrified CBN wheels, IDR, 2003, №4, p.p.53-56. **20.** Jakimov A.A. Uslovie parametricheskoj neustojchivosti uprugoj sistemy stanka pri shlifovanii krugami s preryvistoj rabochej poverhnost'ju // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni. – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – Vip.8 – s. 201-210.