

Я. О. Шахбазов, В. В. Широков, І. М. Грінер, В. А. Сторощук  
Українська академія друкарства, м. Львів

## МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИСТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ

© Шахбазов Я. О., Широков В. В., Грінер І.М., Сторощук В. А., 2017

*Проведено аналіз процесу шліфування та визначено шляхи технологічного забезпечення шорсткості обробленої поверхні цим методом; на підставі проведених теоретичних досліджень процесу здійснено правки шліфувальних кругів алмазними інструментами. Запропоновано модель статистичної характеристики робочої поверхні шліфувальних кругів після їх правки методом точіння алмазними інструментами.*

*Ключові слова: шліфувальний круг, алмазний інструмент, правка, рельєф, абразивне зерно.*

*Most grinding operations involves preliminary machining of abrasive discs work surface to create some relief and cutting properties depending on the requirements of the grinding process and the quality of the machined surface. Usually grinding in the self-sharpen mode is not ensured stability of the relief work surface, making it difficult to achieve the required surface roughness on the operations of details finishing treatment. The purpose of these studies is determining ways of predicting the effects of editing grinding wheels for technological support of surface roughness during grinding through the creation of model of the statistical characteristics of the working surface grinding wheels after revision by turning diamond tools.*

*Calculations have shown that diamond grinding wheel editing can be performed with greater depth due to decreasing of radius at the top crystal. This can increase the stability of the abrasive wheel and reduce the number of amendments, which reduces the cost of grinding wheels during grinding. Thus, the results of calculations of the statistical characteristics of the working surface of the grinding wheel can be used to determine the technological conditions of grinding wheels corrections to ensure the roughness of surface and reduce costs across grinding operations.*

*Developed and justified the use of model of the statistical characteristics of the working surface grinding wheels after revision by turning diamond tools for calculating the distance between the abrasive grains and kinematic component of surface roughness. According to the adopted law distribution and the calculation method inefficient spending of grinding wheel during editing process at 30 - 50 % preservation of grains on the working surface can be reduced within 10... 20 % by selecting the diamond crystal size of ruling tool.*

*Key words: grinding wheels, diamond tools, editing, relief, abrasive grain.*

**Постановка проблеми.** Сучасні напрямки розвитку технології машинобудування передбачають широке використання прогресивних технологічних процесів механічної обробки заготовок деталей машин. Технологічні можливості процесу шліфування дають змогу розглядати його як один з методів підвищення ефективності на чорнових та чистових операціях механічного оброблення. Переваги процесу шліфування в забезпеченні високої розмірної точності порядку 2 – 4 мкм, шорсткості обробленої поверхні –  $Ra = 1,25 \dots 0,32$  мкм.

На більшості операцій технологія шліфування передбачає попередню механічну обробку робочої поверхні абразивних кругів з метою створення певного рельєфу і різальних властивостей залежно від вимог до процесу шліфування і якості обробленої поверхні. Як правило, при шліфуванні в режимі самозагострювання шліфувальних кругів не забезпечується стійкість рельєфу їх робочої поверхні, що ускладнює досягнення необхідної шорсткості обробленої поверхні на операціях чистової обробки деталей.

Для більшості шліфувальних кругів обмежувальною умовою часу їх роботи є розмірна стійкість, відновлення якої потребує періодичної примусової обробки їх робочої поверхні, тобто

виконання операції правки робочої поверхні шліфувального круга. Тому переваги шліфування можуть бути реалізовані якнайповніше, як при виготовленні кругів високої якості, так і за можливості примусового керування рельєфом їх робочої поверхні, що особливо важливо в умовах обробки на автоматизованому обладнанні. На підставі такого підходу можна створити різні технологічні способи, які гарантують високу продуктивність обробки, а також якість обробленої поверхні під час шліфування.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проведені дослідження [1, 2, 7, 9] показують, що режим правки дуже впливає на рельєф робочої поверхні шліфувального круга і, відповідно, на шорсткість обробленої поверхні. В умовах мікроруйнування абразивних зерен однокристальним алмазним інструментом під час правки в один прохід з поздовжньою подачею на його поверхні умовно нарізається гвинтовий рівчак з кроком, що дорівнює величині поздовжньої подачі алмазного інструменту на оберт шліфувального круга. За руху алмазного інструмента в прямому та зворотному напрямках з рівною подачею нерівності розташовуються по гвинтовій лінії з кроком, що дорівнює половині величини поздовжньої подачі. Отже, з'являються можливості впливу на рельєф робочої поверхні шліфувальних кругів, їх різальні властивості та на результат процесу шліфування зміною технологічних режимів процесу правки і вибору розміру кристала алмазу. За рахунок зміни режимів (поздовжньої та поперечної подач) можливе регулювання рельєфу робочої поверхні шліфувального круга та його різальних властивостей у широкому діапазоні.

Тому технологічні режими процесу правки шліфувального круга необхідно призначати залежно від вимог до шорсткості обробленої поверхні під час шліфування. Так, наприклад, під час чорнового шліфування робоча поверхня шліфувального круга повинна бути максимально розвиненою, що можна забезпечувати об'ємним руйнуванням абразивних зерен або руйнуванням по елементах зв'язків. Такий характер руйнування робочого поверхневого шару шліфувального круга у певних межах забезпечує максимальні відстані між зернами, їх різновисотність та, відповідно, і продуктивність процесу шліфування за порівняно високої шорсткості обробленої поверхні заготовки.

За напівчистої та чистої обробки деталей основною метою є досягнення низької шорсткості оброблених поверхонь. Це забезпечується як режимами шліфування, так і технологічними параметрами процесу формування рельєфу, що спричиняють мікроруйнування абразивних зерен на поверхні круга. В умовах мікроруйнування абразивних зерен забезпечуються мінімальні відстані між абразивними зернами, їх різновисотність, за яких забезпечується мінімальна шорсткість обробленої поверхні у процесі шліфування.

**Мета досліджень** – визначити шляхи прогнозування впливу умов правки шліфувальних кругів на технологічне забезпечення шорсткості обробленої поверхні під час шліфування за рахунок створення моделі статистичної характеристики робочої поверхні шліфувальних кругів після їх правки методом точіння алмазними інструментами.

**Виклад основного матеріалу.** Призначаючи технологічні режими процесу правки та формування рельєфу робочої поверхні шліфувальних кругів необхідно враховувати поставлену мету – створення високої різальної здатності шліфувального круга чи забезпечення низької шорсткості обробленої поверхні, або одночасно і того та іншого. Очевидно, що зменшення шорсткості обробленої поверхні можна досягти як режимами шліфування, так і зменшенням висоти та кроку нерівностей на робочій поверхні шліфувального круга в процесі правки. Це узгоджується з висновками авторів роботи [2] і полягає в тому, що на шорсткість шліфованої поверхні впливає вже не зернистість круга, що визначається величиною абразивного зерна, а технологічні режими процесу правки. Малі крок та висота нерівностей, що створюються під час правки, роблять крупнозернистий круг ніби дрібнозернистим, що значно розширює область застосування кругів середньої зернистості та застосування їх як під час чорнового, так і чистового шліфування. Усі ці міркування щодо формування рельєфу робочої поверхні шліфувального круга справедливі за умови субмікроруйнування або мікроруйнування абразивних зерен у процесі правки робочого поверхневого шару шліфувального круга, тобто, коли на поверхні самого абразивного зерна можливе утворення мікробащини та мікроставу.

Подібні погляди на вплив технологічних режимів процесу правки на шорсткість шліфованої поверхні випливають і з експериментальних досліджень, наведених у [3, 4]. Показано, що дрібнозернистий круг, який застосовується під час чистового шліфування, різко погіршує оброблювану поверхню, якщо правка його робочої поверхні проведена зі значними руйнуваннями. Однак зі зменшенням поздовжньої подачі алмазного інструменту висота рельєфу на робочій поверхні круга зменшується, кількість активних зерен збільшується і, за даними роботи [3], під час шліфування зростає кількість теплових імпульсів. Це призводить до підвищення температури в зоні шліфування. Зі збільшенням поздовжньої подачі алмазного інструменту можлива поява на робочій поверхні круга необроблених ділянок. Тому правильно говорити не про величину поздовжньої подачі ( $S$ ) алмазного інструменту в процесі правки, а про відношення величини цієї подачі до ширини контакту ( $l_c$ ) кристала алмаза із шліфувальним кругом. Ширина контакту визначається за значенням поперечної подачі алмазного інструменту. Якщо величина  $S/l_c$  буде більшою від одиниці, то на робочій поверхні абразивного круга утвориться рівчак гвинтової форми з необробленими ділянками. У цьому разі перепади висот абразивних зерен будуть значними. Як відомо [3], це призводить до підвищення шорсткості оброблюваної поверхні. За надто малого відношення  $S/l_c$  різальні кромки макропрофілю робочої поверхні шліфувального круга розміщуються щільно, перепад висот абразивних зерен у межах опорної поверхні рельєфу незначний, що різко знижує ефективність процесу шліфування. Очевидно, найдоцільнішим є співвідношення цих параметрів, близьке до одиниці.

Розглянуті особливості впливу технологічних режимів процесу правки на стан робочої поверхні абразивного круга показують, що між технологічними параметрами процесу формування і станом робочої поверхні круга існує певний взаємозв'язок. Під час правки алмазними інструментами методом точіння розміри алмаза та абразивного зерна істотно впливають на різальну здатність абразивного круга і шорсткість оброблюваної поверхні. Тому розміри алмаза та абразивних зерен необхідно враховувати під час проектування технологічних режимів процесу правки робочої поверхні шліфувального круга.

Специфіка шліфувального інструменту така, що в процесі правки майже завжди присутні всі види руйнування зерна круга. Перевага будь-якого виду залежить від фізико-механічних властивостей абразивних зерен, силових навантажень, які діють на вершини різальних кромок, і визначається технологічними параметрами процесу правки. Переважно правка робочої поверхні абразивних кругів методом точіння здійснюється за тієї ж швидкості, що і шліфування.

Як відомо [8], спрацювання абразивних кругів в процесі шліфування на чистових операціях не перевищує 0,02 мм. Статистична характеристика рельєфу робочої поверхні шліфувального круга визначатиметься товщиною видаленого шару та залежить від технологічних умов, до яких необхідно зарахувати режим правки та розміри контактуючих матеріалів.

Тому для визначення кількості зруйнованих абразивних зерен необхідно прийняти закон розподілу їх на робочій поверхні шліфувального круга. Як наведено у [3], за початок відліку необхідно прийняти вершину найбільш виступаючого зерна на робочій поверхні абразивного круга після його спрацювання. Якщо на одиниці робочої поверхні шліфувального круга розташовано  $Z_0$  зерен, то на відстані  $h$ , від вершини найбільш виступаючих зерен цієї поверхні будуть розташовані  $Z_h$ , тобто

$$Z_h = Z_0 F(h), \quad (1)$$

де  $F(h)$  – функція розподілу вершин зерен за значень аргумента  $h$ .

З [6] відомо, що за функцію розподілу вершин абразивних зерен на робочій поверхні абразивного круга необхідно прийняти закон нормального розподілу. Але використання цього закону в області малих відстаней від найбільш виступаючих зерен не дає можливості отримати достовірні результати. Тому теоретичну криву зсувають вліво до осі ординат з умови забезпечення 2 % кількості зерен на нульовому рівні від вершин найбільш виступаючих зерен.

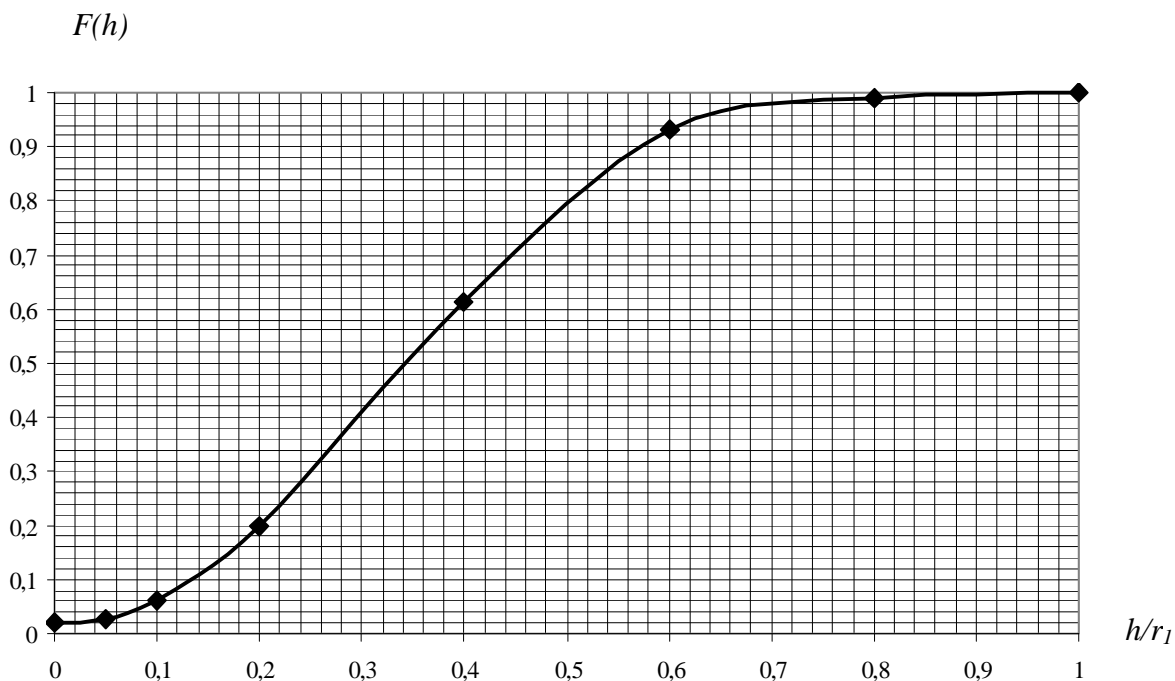
Для таких умов побудований графік залежності функції розподілу  $F(h)$  зерен від співвідношення  $h/r_1$  (рисунок), де  $r_1$  – середньостатистичний радіус абразивного зерна. За лінією тренду графік має поліноміальну характеристику з апроксимуючим рівнянням у вигляді

$$F(h) = 6,4844(h/r_1)^4 - 15,151(h/r_1)^3 + 10,243(h/r_1)^2 - 0,6047(h/r_1) + 0,0267. \quad (2)$$

За залежністю (2) проведений розрахунок статистичних параметрів робочої поверхні абразивного круга діаметром 400 мм, товщиною 40 мм і зернистістю 16, 25 і 40 для 6-ї структури кругів. Результати розрахунків загальної кількості ( $Z_o$ ) та зерен по глибині робочого шару ( $Z_h$ ) наведені у таблиці. Під час розрахунків кількості ( $Z_o$ ) та робочих ( $Z_h$ ) абразивних зерен на робочій поверхні абразивного круга використовували дані по кількості зерен на одиницю площі поверхні круга, які наведені у [4, 6].

В [1, 5, 10, 11] рекомендується здійснювати правку шліфувальних кругів залежно від операції шліфування, тобто завглибшки від 0,005 до 0,06 мм. При цьому не враховуються зернистість абразивного круга і розміри кристала алмаза інструменту. Однак, як показують розрахунки критичної глибини взаємодії кристала алмаза й абразивного зерна, характер руйнування, що забезпечує відповідний рельєф на робочій поверхні круга для виконання операції шліфування також залежить від цих чинників.

Потрібно враховувати і те, що за малих глибин правки ступінь розвиненості робочої поверхні шліфувального круга і його різальна здатність є мінімальними. Тому для зрізання припуску з поверхні заготовок необхідно частіше виконувати правку. За великих глибин правки ті абразивні зерна на робочій поверхні круга, які можуть виконувати зрізання припуску, будуть видалені, що викликає погіршення шорсткості обробленої поверхні під час шліфування. Наприклад, наведемо розрахунок глибини взаємодії ( $h_k$ ) шліфувального круга і кристала алмаза, яка викликає макроруйнування (повне руйнування) абразивного зерна. За радіуса вершини кристала алмаза 0,1 мм: для зернистості 16 –  $h_k = 0,025$  мм; для зернистості 25 –  $h_k = 0,03$  мм; для зернистості 40 –  $h_k = 0,04$  мм. За радіуса вершини кристала алмаза 0,25 мм: для зернистості 16 –  $h_k = 0,019$  мм; для зернистості 25 –  $h_k = 0,021$  мм; для зернистості 40 –  $h_k = 0,025$  мм. За радіуса вершини кристала алмаза 0,5 мм: для зернистості 16 –  $h_k = 0,016$  мм; для зернистості 25 –  $h_k = 0,018$  мм; для зернистості 40 –  $h_k = 0,02$  мм (рисунок).



Графік функції розподілу  $F(h)$  зерен від співвідношення  $h/r_1$

Як відомо з [3], правка шліфувального круга здійснюється до усталеного процесу, тобто подальше видалення абразивного шару за незмінних умов не викликатиме зміну стану робочої поверхні круга. Для цього необхідно, щоб кількість зерен, яка піддається макроруйнуванню від

проходу до проходу, залишалась незмінною. У цьому випадку під час видалення з робочої поверхні абразивного шару з глибиною правки ( $t_k$ ), частина абразивних зерен ( $Z_a$ ), яка піддається руйнуванню із загальної їх кількості за взаємодії з алмазним інструментом, становитиме

$$\frac{Z_a}{Z_h} = 1 - \frac{F(h_c)}{F(h_c + t_k)}, \quad (3)$$

де  $h_c$  – рівень розташування вершин виступаючих зерен.

### Статистичні характеристики робочої поверхні шліфувальних кругів

№	h, мм	r <sub>1</sub> , мм	Z <sub>0</sub> , шт.	Z <sub>h</sub> , шт.	r <sub>2</sub> = 0,05 мм		r <sub>2</sub> = 0,2 мм		Z, шт.	Z <sub>p</sub> , шт.
					z, мм	Z <sub>a</sub> , шт.	z, мм	Z <sub>a</sub> , шт.		
1.	0,01	0,080	783744	65169	0,030	60412	0,042	61914	721829	19273
2.	0,02	0,080	783744	238499	0,040	192939	0,058	201847	581897	15537
3.	0,03	0,080	783744	446430	0,046	304219	0,069	318291	465453	12428
4.	0,04	0,080	783744	624252	0,048	353767	0,076	372633	411110	10977
5.	0,05	0,080	783744	737033	0,048	359985	0,082	393921	389823	10408
6.	0,01	0,125	437088	15905	0,033	15037	0,049	15425	421662	11258
7.	0,02	0,125	437088	58727	0,044	51165	0,068	54127	382960	10225
8.	0,03	0,125	437088	123973	0,051	96318	0,082	105690	331397	8848
9.	0,04	0,125	437088	198265	0,055	133666	0,092	152956	284132	7586
10.	0,05	0,125	437088	271010	0,056	152758	0,100	186752	250335	6684
11.	0,01	0,200	205984	4164	0,035	3900	0,057	4053	201930	5392
12.	0,02	0,200	205984	11155	0,047	10050	0,079	10660	195324	5215
13.	0,03	0,200	205984	24431	0,055	20373	0,095	22517	183466	4899
14.	0,04	0,200	205984	42154	0,060	31649	0,107	37056	168928	4510
15.	0,05	0,200	205984	62682	0,062	40611	0,118	52196	153787	4106

Оскільки руйнування абразивних зерен у процесі формування рельєфу круга відбувається за закономірностями руйнування крихких матеріалів, згідно з якими глибина руйнування перевищує глибину взаємодії зерна і кристала алмаза, а тому під час розрахунків за значення  $h_c$  приймали глибину полюса руйнування ( $z$ ).

Розрахункові значення кількості зруйнованих зерен ( $Z_a$ ) за залежністю (3) наведено в таблиці. Керування кількістю абразивних зерен, які піддаються макроруйнуванню, можна здійснювати вибором глибини правки або розміру кристала алмаза інструменту. Враховуючи те, що спрацювання абразивного круга в процесі шліфування не перевищує 0,02 мм [8], очевидно глибину правки потрібно обмежити у межах до 0,025 мм. Як показали розрахунки, це, своєю чергою, дає змогу зменшити кількість абразивних зерен, які піддаються макроруйнуванню, та використовувати їх для виконання процесу різання під час шліфування.

Користуючись методикою розрахунку кількості зерен та їх відстанями на робочій поверхні шліфувальних кругів [3, 4], можна за даними таблиці пояснити закономірності зміни кінематичної складової шорсткості обробленої поверхні під час шліфування з різними умовами правки шліфувального круга. Як показали розрахунки середньої відстані між абразивними зернами ( $l=2/n^{1/2}$ , мм;  $n$  – кількість абразивних зерен на 1 см<sup>2</sup>), підвищення глибини правки або розміру кристала алмаза викликає збільшення кількості зруйнованих зерен ( $Z_a$ ) та відповідно середньої відстані між абразивними зернами, що погіршує кінематичну складову шорсткості обробленої поверхні під час шліфування. Закономірності зменшення зерен по рівню їх розташування ( $Z$ ) для випадку  $r_2=0,2$  мм наведено у таблиці, внаслідок чого на нульовому рівні розташування зерен їх кількість відповідатиме значенню  $Z_p$ .

Для створення висоти рельєфу на робочій поверхні шліфувального круга під час правки його робочої поверхні необхідно встановити глибину правки ( $t_f$ ) не менше ніж 0,025 мм. За меншого значення глибини правки висота рельєфу на робочій поверхні абразивного круга буде малою, що викликатиме частішу правку та непродуктивні витрати круга. Забезпечення максимальної кількості абразивних зерен на робочій поверхні круга вимагає виконання процесу правки у режимі

мікроруйнування абразивних зерен. Теоретичні розрахунки показують, що такого рельєфу можна досягти під час правки шліфувального круга інструментом з радіусом при вершині кристала алмаза не більше як 0,1 мм, з врахуванням 20 % відхилення. За правки шліфувального круга іншими розмірами кристала алмаза видалення абразивного шару з робочої поверхні круга буде відбуватися в режимі макроруйнування зерен, що викликає непродуктивні витрати круга та підвищення шорсткості обробленої поверхні. За прийнятим законом розподілу і методикою розрахунку непродуктивні витрати шліфувального круга в процесі правки за 30 – 50 % збереження зерен на робочій поверхні можуть бути скорочені у межах до 10...20 % за рахунок вибору розміру кристала алмаза, що викликає зменшення загальних витрат на процес шліфування.

Особливість проведених розрахунків полягає в тому, що зі зменшенням радіуса при вершині кристала алмаза правку шліфувального круга можна виконувати з більшими глибинами. Це дає змогу підвищити стійкість абразивного круга та скоротити кількість правок, що призводить до зменшення витрат шліфувальних кругів під час шліфування. Отже, отримані результати розрахунків статистичних характеристик робочої поверхні шліфувального круга можна використати під час визначення технологічних умов правки шліфувальних кругів для забезпечення шорсткості обробленої поверхні та скорочення витрат на різних операціях шліфування.

**Висновки.** Розроблено та обґрунтовано застосування моделі статистичної характеристики робочої поверхні шліфувальних кругів після правки методом точіння алмазними інструментами для розрахунку відстані між абразивними зернами і кінематичною складовою шорсткості обробленої поверхні. За прийнятим законом розподілу і методикою розрахунку непродуктивні витрати шліфувального круга в процесі правки за 30 – 50 %-го збереження зерен на робочій поверхні можуть бути скорочені у межах до 10...20 % за рахунок вибору розміру кристала алмаза правильного інструменту.

1. *Абразивная и алмазная обработка материалов / под ред. д-ра техн. наук А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 392 с.* 2. *Коломиец В. В., Полупан Б. И., Химач О. В. Алмазный инструмент фасонного профиля. – К.: Наук. думка, 1992. – 176 с.* 3. *Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975. – 192 с.* 4. *Пилинский В. И. Температура и характер контакта при плоском шлифовании торцом круга // Труды ВНИИАШ.– Л. Машиностроение, 1968. – № 8. – С. 79 – 88.* 5. *Прогрессивные методы правки абразивных кругов / под ред. В. И. Пилинского. – К.: Техніка, 1985. – 112 с.* 6. *Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.* 7. *Романов В. Ф., Авакян В. В. Технология алмазной правки шлифовальных кругов. – М.: Машиностроение, 1980. – 118 с.* 8. *Филимонов Л. Н. Стойкость шлифовальных кругов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 136 с.* 9. *Baul R. M., Graham D., Scott W. Charakterization of the working surface of abrasive wheels // Tribology, 1972. – 5, № 4. – P. 169–176.* 10. *Konig W., Lortz W. Einflub des Abrichtwerkzeuges und der Abrichtbedingungen auf die Schleifscheiben topographie und das Arbeitsergebnis. // Ind. Anz., 1976, 98. – No. 14. – S. 233 – 235.* 11. *Konig W., Lortz W. Three dimensional measurment of the grinding wheel surface-evaluation and effect of cutting behaviour // CiRP Ann. – 1976. – 25, No. 1. – P. 197–202.*