

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КРУГОВ НА КЕРАМИЧЕСКОЙ И БАКЕЛИТОВОЙ СВЯЗКАХ

*Н.С. АЛЕКСЕЕВ, канд. техн. наук, доцент  
В.А. КАПОРИН, инженер  
С.В. ИВАНОВ, инженер  
(РИИ АлтГТУ, г. Рубцовск)*

Поступила 30 марта 2016  
Рецензирование 29 апреля 2016  
Принята к печати 15 мая 2016

**Алексеев Н.С.** – 658207, г. Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6,  
Рубцовский индустриальный институт АлтГТУ,  
e-mail: tm@rubinst.ru

Шлифование износостойких микропористых покрытий на никелевой и железной основе отмечается низкой шлифуемостью и сопровождается быстрой потерей абразивными кругами режущей способности из-за высокой теплосиловой напряженности процесса, интенсивного износа и засаливания кругов. При шлифовании работа абразивного зерна в значительной степени зависит от прочности удержания его в круге, т. е. от типа и количества связки. Учитывая низкую теплопроводность и склонность микропористых покрытий к прижогаобразованию при шлифовании, становится особенно важным снижение затрат на трение. Этому условию может удовлетворять выбор более антифрикционного материала связок при соблюдении требований достаточно надежного закрепления абразивных зерен в круге.

В статье представлены результаты исследований режущей способности кругов из электрокорунда и карбида кремния на керамической и бакелитовых связках при черновом шлифовании микропористых покрытий на никелевой и железной основе. Установлены периоды стойкости кругов и производительность обработки, исследованы силовая напряженность шлифования, энергозатраты и другие показатели. Сделано заключение о целесообразности перехода к использованию абразивного инструмента на керамической связке, что позволяет увеличить стойкость кругов и производительность обработки при одновременном снижении силовой напряженности процесса шлифования и энергозатрат по сравнению с кругами на бакелитовой связке. Комплексная оценка результатов испытаний показала, что наибольшей эффективностью при круглом наружном шлифовании микропористых покрытий на никелевой основе обладает абразивный круг из электрокорунда на керамической связке, а при шлифовании покрытий на железной основе – абразивный круг из карбида кремния также на керамической связке.

**Ключевые слова:** плазменные покрытия, абразивная обработка, связка, шлифовальные круги, силы резания, износ инструмента, шероховатость поверхности.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-21-27

## Введение

Нанесение микропористых износостойких покрытий на никелевой и железной основе (далее покрытий) для упрочнения и восстановления изношенных деталей машин давно стало общепризнанным [1]. Основным методом черновой обработки этих покрытий является шлифование.

При этом работоспособность абразивного инструмента (АИ), интенсивность съема материала, качество изделий после обработки и экономичность шлифования во многом определяются видом связующего, или связки [2, 3]. В связи с этим выбором связки придают важное значение.

Шлифовальный инструмент из сверхтвердых материалов (СТМ) – синтетического алмаза и

эльбора – изготавливают на металлической, керамической и органической связках. Исследования установили [4–9], что при шлифовании покрытий алмазными кругами на металлической связке происходит интенсивное «засаливание» их рабочей поверхности. Это связано с наличием химического сродства материала детали с материалом связки, являющейся причиной интенсивного образования «налипов» из продуктов шлифования, а также высокой прочностью металлической связки. Поэтому эти круги быстро теряют режущую способность и их использование затруднено.

Лучшие результаты при шлифовании покрытий показали круги из СТМ на органической связке [4, 6, 9]. Обладая демпфирующей способностью, эта связка позволяет алмазным и эльборовым зернам лучше использовать их режущие свойства. Алмазные круги на органической связке хорошо самозатачиваются, на режущей поверхности инструмента заметные «налипы» отсутствуют, и процесс шлифования протекает стабильно.

Промежуточное положение по величине износа и достигаемому периоду стойкости занимают шлифовальные круги (ШК) из СТМ на керамической связке [7–9]. При работе этими кругами тоже имеет место незначительное образование «налипов», но они удаляются вместе с достаточно мягкой связкой. Постепенно этот процесс приводит к обновлению режущей поверхности ШК и можно считать, что круг работает в режиме самозатачивания.

Из сказанного следует, что круги из СТМ на органической и керамической связках в целом хорошо зарекомендовали себя на практике при шлифовании покрытий, однако они значительно дороже абразивных, поэтому и не нашли широкого применения в промышленности [6, 7].

При изготовлении абразивных инструментов из традиционных шлифовальных материалов – электрокорунда и карбида кремния – наиболее распространенными являются керамическая, бакелитовая и вулканитовая связки [10]. Довольно редко используются силикатовые, магниезильные и другие связки.

При выборе связки для шлифования компактных (однородных) материалов основное внимание обращают на вид и характер операций абразивной обработки и на условия рабо-

ты инструмента. Вулканитовые связки обычно используются при изготовлении кругов для отрезки, шлифования пазов и фасонных поверхностей, отделочного шлифования и полирования [11]. Для размерной черновой и чистовой абразивной обработки деталей используются преимущественно круги на керамической и бакелитовой связке.

Однако в технической литературе отсутствуют рекомендации и систематизированные данные о влиянии вида связки на основные показатели процесса чернового шлифования покрытий кругами из электрокорунда и карбида кремния. В статье представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных в целях сравнительной оценки работоспособности ШК на керамической и бакелитовой связке при черновом шлифовании покрытий.

### Методика экспериментального исследования

Для определения влияния вида связки на основные показатели процесса шлифования покрытий проведено комплексное исследование работоспособности опытных кругов. Исследования проводились на экспериментальной установке на базе круглошлифовального полуавтомата мод. 3М152МВФ2 с ЧПУ по схеме круглого наружного продольного шлифования с выхаживанием по методике [12]. Шлифовали образцы – втулки из стали 45 диаметром  $60 \pm 0,1$  мм и высотой 70 мм с плазменно-напыленными покрытиями на никелевой (покрытие ПВ) и железной (покрытие ПЖ) основе [12].

Покрытия обрабатывали серийными кругами из электрокорунда нормального (14А) на керамической (V) и бакелитовой (B) связках с характеристикой 14AF46N6 формы 1 600×25×305 ГОСТ Р52781–2007. Для сравнения испытывались круги из карбида кремния черного 54CF46N6 также на связках V и B тех же геометрических размеров. Выбор типоразмера и характеристики кругов для проведения экспериментов был обусловлен их широким применением в промышленности [13].

Параметры режима резания, подобранные на основании рекомендаций [5], поддерживались неизменными: скорость резания 35 м/с, скорость вращения детали 18,84 м/мин, скорость

продольной подачи 425 мм/мин и глубина резания 10 мкм.

Экспериментальная установка оснащена системами подачи СОЖ с поливом в зону шлифования и очистки ее от шлифовального шлама с помощью магнитного сепаратора и бака-отстойника. В качестве СОЖ применялся 3%-й водный раствор эмульсола «ЭПМ-1шп», который подавали поливом в зону шлифования свободно падающей струей через клиновой насадок с расходом 12 л/мин.

ШК правили методом обтачивания алмазным карандашом 3308-0054 (ГОСТ 607–80) с непрерывной подачей СОЖ поливом с расходом 4 л/мин. Режим правки: четыре рабочих хода с подачей 0,03...0,04 мм/дв.ход; два прохода без подачи алмазного карандаша; скорость продольной подачи 140±5 мм/мин.

Для оценки работоспособности АИ использовали перечисленные ниже критерии.

1. Период стойкости  $T$  кругов, определяемый по появлению следов дробления или прижогов на шлифованной поверхности, мин.

2. Удельная производительность, мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>:

$$q = Q_m / Q_a$$

где  $Q_m$  – объем материала, снятого с заготовки (образца) за период стойкости ШК, мм<sup>3</sup>;  $Q_a$  – объем рабочего слоя ШК, израсходованного за тот же период, мм<sup>3</sup>.

3. Коэффициент режущей способности абразивного круга, мм<sup>3</sup>/мин·Н:

$$K_p = Q_m / TP_y,$$

где  $P_y$  – среднее значение радиальной составляющей силы резания за период стойкости ШК, Н.

4. Удельная мощность шлифования, Вт·мин/мм<sup>3</sup>:

$$K_N = N_{эф} / Q_m,$$

где  $N_{эф}$  – эффективная мощность шлифования, Вт:

$$N_{эф} = P_z V_{кр} / 102,$$

где  $P_z$  – среднее значение тангенциальной составляющей силы резания за период стойкости ШК, Н;  $V_{кр}$  – скорость резания, м/с.

5. Шероховатость шлифованной поверхности, оцениваемая по параметру  $Ra$ , мкм.

6. Комплексный критерий, мм<sup>3</sup>/мин·Вт·мкм:

$$K_m = Q_m / N_{эф} Ra.$$

7. Интенсивность засаливания ШК за период их стойкости при шлифовании покрытия ПЖ, мг/см<sup>2</sup>·мин:

$$C_3 = m / S_k T,$$

где  $m$  – количество налипшего материала на рабочую поверхность ШК за период его стойкости, мг;  $S_k$  – площадь рабочей поверхности ШК, см<sup>2</sup>.

Продолжительность опытов равнялась периоду стойкости круга. По ходу экспериментов фиксировали составляющие  $P_y$  и  $P_z$  силы резания с помощью измерительной установки. По окончании каждого опыта определяли величину припуска, снятого с образца за время эксперимента, измеряли его размерный износ и контролировали шероховатость шлифованной поверхности. Затем определяли значения всех расчетных показателей процесса шлифования ( $Q_m$ ,  $Q_a$ ,  $q$ ,  $K_p$ ,  $K_N$ ,  $K_m$  и  $C_3$ ).

Измерение диаметра образцов до и после шлифования производилось гладким микрометром Din 863 (производство фирмы «Микрон», Чешская Республика) с ценой деления 0,01 мм. Размерный износ АИ измеряли индикатором часового типа с ценой деления 0,001 мм. Шероховатость шлифованной поверхности контролировалась на профилографе – профилометре АБРИС – ПМ7. Наличие прижогов на поверхности устанавливалось визуально.

Испытания кругов проводили трехкратно, что обеспечивало достоверность полученных результатов с вероятностью  $P = 0,95$ . По каждой серии опытов определялись средние значения показателей.

### Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Результаты испытаний кругов при круглом наружном продольном шлифовании покрытий показаны в таблице. Видно, что при обработке покрытия ПВ круги на керамической связке как из электрокорунда, так и из карбида кремния имели больший период стойкости, чем круги из 14А и 54С на бакелитовой связке, что объясняется лучшими антифрикционными свойствами керамической связки [14].

**Усредненные показатели продольного шлифования плазменных покрытий кругами на керамической и бакелитовой связках**

Показатели шлифования		Характеристики кругов			
		14AF46N6V/B	54CF46N6V/B	14AF46N6V/B	54CF46N6V/B
		Результаты, полученные при шлифовании покрытия на никелевой основе кругами на керамической (числитель) и бакелитовой (знаменатель) связках		Результаты, полученные при шлифовании покрытия на железной основе кругами на керамической (числитель) и бакелитовой (знаменатель) связках	
Стойкость кругов $T$ , мин		6,5/5,9	3,1/3,0	13,1/9,6	50,0/22,0
Удельная производительность $q$ , мм <sup>3</sup> /мм <sup>3</sup>		3,5/2,8	1,7/2,4	5,2/6,2	28,3/19,4
Составляющие силы шлифования, Н	$P_y$	103/162	179/121	117/118	104/112
	$P_z$	59/95	96/79	57/67	40/56
Удельная мощность шлифования $K_N$ , Вт·мин/мм <sup>3</sup>		57,3/106	98,5/80,8	57,2/61,6	33,9/49,8
Коэффициент режущей способности $K_p$ , мм <sup>3</sup> /мин·Н		3,4/1,9	1,9/2,7	2,9/3,2	3,9/3,4
Комплексный критерий $K_M$ , мм <sup>3</sup> /мин·Вт·мкм		0,093/0,045	0,070/0,052	0,081/0,066	0,127/0,048
Шероховатость поверхности $Ra$ , мкм		0,19/0,21	0,14/0,24	0,32/0,35	0,23/0,41
Интенсивность засаливания кругов $C_3$ , мг/см <sup>2</sup> ·мин		–	–	0,075/0,071	0,033/0,079

Удельная производительность  $q$ , достигаемая кругом 14AF46N6V, превышала этот показатель для кругов 14AF46N6B и 54CF46N6B соответственно в 1,3 и 1,5 раза, что свидетельствует о наименьшей интенсивности его изнашивания. Причину такого различия можно объяснить более надежным закреплением абразивных зерен в круге при использовании керамической связки [15, 16].

Исследования силовой напряженности и энергозатрат показали (см. таблицу), что при шлифовании покрытия ПВ кругом 14AF46N6V силы  $P_y$  и  $P_z$  уменьшились по сравнению с шлифованием кругами 14AF46N6B и 54CF46N6B соответственно на 17...57 и 34...61 %, а энергозатраты соответственно на 85 и 41 %.

Наибольшие значения коэффициента  $K_p$  при шлифовании покрытия ПВ получены при использовании электрокорундового круга на связке  $V$ . При оценке технологической эффек-

тивности по комплексному критерию  $K_M$  также выявляются преимущества круга из 14А на керамической связке.

При шлифовании покрытия ПВ существенных различий значений параметра  $Ra$  шероховатости поверхностей, шлифованных кругами на керамической и бакелитовой связках, не выявлено.

При обработке покрытия ПЖ, как и при шлифовании покрытия ПВ, периоды стойкости кругов из 14А и 54С на керамической связке оказались более продолжительными по сравнению с кругами из электрокорунда и карбида кремния на бакелитовой связке (см. таблицу). Так, значение  $T$ , зафиксированное для АИ 14AF46N6V, превысило этот показатель для круга 14AF46N6B в 1,4 раза, а период стойкости ШК 54CF46N6V оказался в 2,3 раза больше, чем у круга 54CF46N6B.

Наименьшая силовая напряженность процесса шлифования покрытия ПЖ получена при

использовании круга из 54С на связке V, а следовательно, и удельная мощность шлифования этим кругом ниже, чем кругами 14AF46N6B и 54CF46N6B соответственно на 82 и 47 %. Следует отметить, что достигнутые результаты по силам  $P_y$  и  $P_z$  и удельной мощности  $K_N$  для круга 54CF46N6V получены при существенно большем значении периода его стойкости ( $T = 50$  мин). Шлифовальный инструмент из 54С на керамической связке обеспечивает наименьшую интенсивность изнашивания его рабочей поверхности ( $q = 28,3 \text{ мм}^3/\text{мм}^3$ ). При использовании круга из 54С на связке V были достигнуты наибольшие значения коэффициента  $K_p$  и комплексного критерия  $K_m$ .

Применение круга из 54С на керамической связке позволяет получить шлифованные поверхности с меньшим параметром шероховатости ( $Ra = 0,23 \text{ мкм}$ ), что в совокупности с меньшими значениями сил  $P_y$  и  $P_z$  положительно сказывается на качестве обработанной поверхности и уменьшает вероятность отслаивания покрытия.

Интенсивность засаливания  $C_3$  круга 54CF46N6V при шлифовании покрытия ПЖ оказалась более чем в два раза ниже по сравнению с этим показателем, достигаемым при обработке кругами 14AF46N6B и 54CF46N6B.

## Выводы

1. Комплексная оценка результатов испытаний показала, что при круглом наружном шлифовании с продольной подачей микропористых покрытий на никелевой и железной основе кругами из электрокорунда и карбида кремния на бакелитовой связке не обеспечивает достаточной технологической эффективности.

2. Более высокая режущая способность АИ в рассмотренных условиях шлифования микропористых покрытий на никелевой основе по совокупности установленных показателей обеспечивается кругом из электрокорунда на керамической связке.

3. В рассмотренных условиях обработки микропористых покрытий на железной основе более высокие эксплуатационные возможности показал абразивный круг из карбида кремния также на керамической связке.

## Список литературы

1. Черноиванов В.И., Лялякин В.П. Организация и технология восстановления деталей машин. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: ГОСНИТИ, 2003. – 488 с.
2. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
3. Nagaraj A.P., Ghattopadhyay A.K. On some aspects of wheel loading // Wear. – 1989. – Vol. 135, iss. 1. – P. 41–52. – doi: 10.1016/0043-1648(89)90094-X.
4. Кащук В.А., Верещагин А.Б., Чистяков Е.М. Шлифование детонационных покрытий // Новые сверхтвердые материалы и прогрессивные технологии их применения: тезисы докладов всесоюзной конференции, Канев, сентябрь 1985. – Киев: ИСМ, 1985. – С. 140–141.
5. Совершенствование процесса шлифования износостойких покрытий / П.И. Ящерицын, С.Н. Казаков, С.И. Миткевич, А.И. Белицкая // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: межвузовский сборник научных трудов. – Пенза, 1986. – Вып. 14. – С. 3–8.
6. Сире Ю.С. Обрабатываемость наплавов и покрытий алмазными кругами при торцевом и круглом шлифовании // Прогрессивные процессы шлифования, инструменты и его рациональная эксплуатация: тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции, Ереван, 14–16 октября 1986 г. – М., 1986. – С. 124–127.
7. Сире Ю.С., Горбатовский В.М. Определение областей эффективного использования алмазных кругов при шлифовании наплавов и покрытий // Повышение технического уровня алмазных инструментов: труды ВНИИалмаза. – М., 1987. – С. 26–32.
8. Иванов В.А., Спиринов В.А., Фассахов И.Т. Износостойкость шлифовальных кругов при обработке деталей с напыленными покрытиями // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении: межвузовский сборник научных трудов. – Пермь, 1990. – С. 145–150.
9. Неклюдов В.И. Выбор режущего инструмента и режимов при точении и шлифовании покрытия ПН85Ю15 // Трение. Износ. Смазка. – 2003. – Т. 5, № 4. – С. 65–69.
10. Дятлов В.Н. Исходные материалы для абразивного инструмента // Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: сборник научных трудов. – Челябинск, 1997. – С. 63–73.
11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

12. Алексеев Н.С., Иванов С.В., Капорин В.А. Шлифование плазменных покрытий на никелевой и железной основе // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: в 2 ч.: материалы 16-й международной научно-практической конференции. – СПб., 2014. – Ч. 1. – С. 181–187.

13. Худобин Л.В., Правиков Ю.М. Анализ номенклатуры абразивных инструментов, применяемых на предприятиях Ульяновской области // Вестник УлГТУ. – 2003. – № 1/2. – С. 34–36.

14. Шлифование сплавов на основе титана: методические рекомендации / Г.И. Саютин, И.В. Хар-

ченко, А.Д. Богуцкий, Д.Н. Спиридонов, А.П. Гатаинов, В.А. Носенко. – М.: НИИМАШ, 1977. – 27 с.

15. Смирнов В.А., Григорьева К.Т., Саютин Г.И. Пути снижения работы трения в зоне резания за счет уменьшения количества связки в круге // Физико-химические явления при шлифовании: материалы семинара (г. Волжский, 3–5 октября 1972 г.). – Киев, 1976. – С. 14–17.

16. Stokes R.J., Valentine T.J. Wear mechanisms of ABN abrasive // Industrial Diamond Review. – 1984. – Iss. 1. – P. 34–44.

## OBRAHOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 21–27

### A comparative analysis of the efficiency of ceramic and bakelite bonded grinding wheels

Alexeev N. S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: tm@rubinst.ru,

Kaporin V. A., Engineer, e-mail: kaporinvl@mail.ru

Ivanov S. V., Engineer, e-mail: vitsal\_72@mail.ru

Rubtsovsk Industrial Institute, Branch of I.I. Polzunov Altai State Technical University, 2/6 Traktornaya st., Rubtsovsk, 658207, Russian Federation

#### Abstract

Grinding of nickel and iron based wear-resistant microporous coatings is marked to have low grindability and is accompanied by a rapid loss of cutting capacity of the abrasive wheels due to the high intensity of thermal power process, intensive wear and wheels smearing. In the grinding operation the performance of the abrasive grains largely depends on the strength of its retention in the disc, i.e. the type and number of bond. In consideration of the low thermal conductivity and the tendency of micro porous coatings to burn during grinding, it is particularly important to minimize friction costs. This requirement can be met by a choice of more antifriction material of the bonds while meeting the requirements of a sufficiently reliable fastening of the abrasive grains in the wheel.

The research data on the cutting ability of wheels of aluminum oxide and silicon carbide with a ceramic and bakelite bond for rough grinding of nickel and iron based microporous coatings are presented in the article. Redress life and process efficiency are established, grinding power strain, energy demands and other indicators are investigated. The findings of the feasibility of the transition to the use of an abrasive tool with a ceramic bond, which allows increasing the wheels resistance and processing performance while reducing power strain of the grinding process and energy demands compared with wheels on bakelite base, are made. A comprehensive assessment of the test results showed that in the round external grinding of nickel-based microporous coatings the most effective is an abrasive wheel of made of electrocorundum with a ceramic bond, and when grinding iron-based coating – abrasive wheel made of silicon carbide with a ceramic bond.

#### Keywords

plasma coatings, abrasive tool, bond, grinding wheels, cutting forces, tool wear out, surface roughness

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-21-27

#### References

1. Chernov Ivanov V.I., Lyalyakin V.P. *Organizatsiya i tekhnologiya vosstanovleniya detalei mashin* [Organization and technology of details of machines]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, GOSNITI Publ., 2003. 488 p.

2. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory of grinding materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 319 p.
3. Nagaraj A.P., Ghattopadhyay A.K. On some aspects of wheel loading. *Wear*, 1989, vol. 135, iss. 1, pp. 41–52. doi: 10.1016/0043-1648(89)90094-X
4. Kashchuk V.A., Vereshchagin A.B., Chistyakov E.M. [Grinding detonation coatings]. *Tezisy dokladov vsesoyuznoi konferentsii "Novye sverkhтвердые материалы i progressivnye tekhnologii ikh primeneniya"* [Proceedings of the All-Union Conference "New superhard materials and advanced technology of their application"]. Kiev, 1985, pp. 140–141.
5. Yashcheritsyn P.I., Kazakov S.N., Mitkevich S.I., Belitskaya A.I. [Improving the process of grinding wear-resistant coatings]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov "Almaznaya i abrazivnaya obrabotka detalei mashin i instrumenta"* [The interuniversity collection of scientific papers "Diamond and abrasion of machine parts and tools"], 1986, iss. 14, pp. 3–8.
6. Sire Yu.S. [Workability claddings and coatings diamond wheels in face and cylindrical grinding]. *Tezisy dokladov vsesoyuznoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Progressivnye protsessy shlifovaniya, instrumenty i ego ratsional'naya ekspluatatsiya"* [Proceedings of the All-Union Scientific and Technical Conference "Progressive grinding processes, tools, and its rational exploitation"]. Moscow, 1986, pp. 124–127.
7. Sire Yu.S., Gorbatoivskii V.M. [Determination of the effective use of diamond wheels for grinding weld overlays and coatings]. *Trudy VNIImazma "Povyshenie tekhnicheskogo urovnya almaznykh instrumentov"* [Proceedings of the Scientific-research institute for natural, synthetic diamond and tools "Raising the technical level of diamond tools"]. Moscow, 1987, pp. 26–32.
8. Ivanov V.A., Spirin V.A., Fassakhov I.T. [The wear resistance of the grinding wheel in the processing of parts with a spray coating]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov "Sovershenstvovanie protsessov abrazivno-almaznoi i uprochnyayushchei obrabotki v mashinostroenii"* [The interuniversity collection of scientific papers "Process improvement diamond abrasive and hardening treatment in mechanical engineering"]. Perm', 1990, pp. 145–150.
9. Neklyudov V.I. Vybor rezhushchego instrumenta i rezhimov pri tochenii i shlifovanii pokrytiya PN85Yu15 [The choice of cutting tools and modes for turning and grinding coating ПН85Ю15]. *Trenie. Iznos. Smazka – Friction. Wear. Lubricant*, 2003, vol. 5, no. 4, pp. 65–69.
10. Dyatlov V.N. [The starting materials for abrasive tools]. *Sbornik nauchnykh trudov "Mashiny i tekhnologiya obrabotki davleniem poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov"* [Proceedings of scientific papers "Machines and technology forming powder and composite materials"]. Chelyabinsk, 1997, pp. 63–73.
11. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya*. V 2 t. T. 2 [The handbook of technologist-machine engineer. In 2 vol. Vol. 2]. 4<sup>th</sup> ed., corrected. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 496 p.
12. Alekseev N.S., Ivanov S.V., Kaporin V.A. [Grinding plasma coatings on nickel and iron base]. *Materialy 16-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Tekhnologii uprochneniya, naneseniya pokrytii i remonta: teoriya i praktika"*. V 2 ch. Ch. 1 [Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference "Hardening, coating and repair technologies: Theory and Practice", St. Petersburg, 15–18 April 2014: in 2 pt.]. St. Petersburg, 2014, pt. 1, pp. 181–187. (In Russian)
13. Khudobin L.V., Pravikov Yu.M. *Analiz nomenklatury abrazivnykh instrumentov, primenyaemykh na predpriyatiyakh Ul'yanovskoi oblasti* [The analysis of the nomenclature of the abrasive tools used at the enterprises of the Ulyanovsk area]. *Vestnik UIGTU – Vestnik of UISTU*, 2003, no. 1–2, pp. 34–36.
14. Sayutin G.I., Kharchenko I.V., Bogutskii A.D., Spiridonov D.N., Gatarinov A.P., Nosenko V.A. *Shlifovanie splavov na osnove titana: metodicheskie rekomendatsii* [Grinding of titanium-based alloys. Guidelines]. Moscow, NIIMASh Publ., 1977. 27 p.
15. Smirnov V.A., Grigor'eva K.T., Sayutin G.I. [Ways to reduce the work of friction in the cutting area by reducing the number of bundles in a circle]. *Materialy seminara "Fiziko-khimicheskie yavleniya pri shlifovanii"* [Proceedings of scientific seminar "The physico-chemical phenomena in grinding", Volzhsky, 3–5 October 1972]. Kiev, 1976, pp. 14–17.
16. Stokes R.J., Valentine T.J. Wear mechanisms of ABN abrasive. *Industrial Diamond Review*, 1984, iss. 1, pp. 34–44.

**Article history:**

Received 30 March 2016

Revised 29 April 2016

Accepted 15 May 2016