

Лезвийная обработка закаленных сталей инструментами из кубического нитрида бора

В.А. Гартфельдер^a, Л.С. Секлетина^b, А.Р. Яньюшкин^c

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр. Московский, 15, Чебоксары, Чувашская Республика
^a harvik48@list.ru, ^b larsek@list.ru, ^c andreyyanyushkin@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0933-7991>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-5744-8987>
Статья поступила 09.10.2019, принята 05.02.2020

В статье рассмотрена проблема механической обработки закаленных сталей лезвийными инструментами из сверхтвердых материалов, имеющих уникальные физико-механические свойства. Из широкой гаммы сверхтвердых материалов были выбраны материалы на основе кубического нитрида бора (КНБ). В качестве режущего инструмента применяли токарные резцы из гексанита-Р, одного из видов поликристаллического кубического нитрида бора, имеющего более высокую из всех марок КНБ ударную стойкость. Обрабатывали легированные стали различных марок, из которых изготавливаются детали, подвергаемые упрочняющей термической обработке с последующей механической обработкой шлифованием. Приведены результаты исследования износостойкости резцов при точении закаленных сталей этих марок разной твердости. Рассмотрено влияние изменения скорости резания, различия марок обрабатываемого материала разной степени упрочнения, применения различных составов смазочно-охлаждающих жидкостей на износостойкость испытываемого инструмента. Показано, что для инструмента из гексанита-Р все исследуемые параметры с разной интенсивностью влияют на стойкость резцов. При обработке некоторых марок сталей наиболее заметно сказывается изменение скорости резания, для других марок материалов — вид и количество легирующих элементов. Показано их неоднозначное влияние твердость заготовок. Проведено исследование влияния различных составов смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) на износостойкость КНБ. Установлено, что все составы применяемых СОЖ позволяют повысить работоспособность инструмента из гексанита-Р, и эта зависимость носит экстремальный характер в скоростном диапазоне от 1 до 2 м/с. На основе проведенных исследований сделано предположение о протекании различных физико-химических процессов в зоне контакта обрабатываемого и инструментального материалов с превалированием разных механизмов в каждой конкретной ситуации. Положительное влияние СОЖ на стойкость инструмента объясняется созданием на контактных поверхностях разделительных смазочных пленок, экранирующих взаимодействие контртел, что обеспечивает снижение теплонапряженности в зоне резания и повышение срока службы инструмента из КНБ.

Ключевые слова: резание; инструмент; кубический нитрид бора; сталь; твердость; износ; стойкость; смазочно-охлаждающая жидкость.

Edge cutting machining of tempered steel with the help of tools made of cubic boron nitride

V.A. Gartfelder^a, L.S. Sekletina^b, A.R. Yanyushkin^c

Chuvash State University; 15, Moskovsky Ave., Cheboksary, Republic of Chuvashia

^a harvik48@list.ru, ^b larsek@list.ru, ^c andreyyanyushkin@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0933-7991>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-5744-8987>
Received 09.10.2019, accepted 05.02.2020

The article deals with the problem of hardened steels machining with blade tools from superhard materials having unique physical and mechanical properties. From a wide range of superhard materials, the materials based on cubic boron nitride (CBN) were selected. As a cutting tool, we used turning tools from hexanite-R, one of the types of polycrystalline cubic boron nitride, which has the highest impact resistance of all CBN brands. Alloy steels of various grades, from which parts are manufactured, were processed. These parts are subjected to hardening heat treatment with subsequent mechanical processing by grinding. The results of the study of the wear resistance of cutters when turning hardened steels of these grades of different hardness are presented. The influence of changes in cutting speed, differences in the grades of the processed material of different degrees of hardening, the use of various compositions of cutting fluids on the wear resistance of the tested tool is considered. It is shown that for a tool made of hexanite-R, all the studied parameters with different intensities affect the resistance of the cutters. When processing some grades of steel, the change in cutting speed is most noticeable, for other grades of materials the type and number of alloying elements is more pronounced, the ambiguous influence of the hardness of the workpieces is shown. A study of the influence of various compositions of cutting fluids (coolants) on the wear resistance of CBN was conducted. It is found that all the compositions of used coolants can improve the performance of a hexanite-R tool and this dependence is extreme in the speed range from 1 to 2 m/s. Based on the studies, an assumption is made about the occurrence of various physical and chemical processes in the contact zone of the processed and instrumental materials with the prevalence of different mechanisms in each specific situation. The positive effect of a coolant on the tool life is explained by the creation on the contact surfaces of

separating lubricating films that shield the interaction of the counterbody. Thus, there is a decrease in heat stress in the cutting zone and an increase in the service life of the tool from the CBN.

Keywords: cutting; tool; cubic boron nitride; steel; hardness; wear; durability; coolant.

Введение. Экономические условия, в которых работают современные машиностроительные предприятия, требуют применения новых эффективных технологий. Механическая обработка деталей из высокопрочных, твердых и труднообрабатываемых материалов является одним из таких процессов и достаточно широко распространена в промышленности [1–5]. Наиболее часто в практике встречаются операции, связанные с окончательной обработкой закаленных сталей. На этих операциях широкое распространение получили лезвийные инструменты, оснащенные режущими элементами из сверхтвердых материалов, режущей керамики и различных марок твердых сплавов [8; 13; 23].

Новые инструментальные материалы на основе поликристаллического кубического нитрида бора (КНБ) обладают уникальными физико-механическими свойствами [1; 4; 12]. Эти свойства дают возможность успешного применения лезвийной механообработки труднообрабатываемых и термоупрочненных материалов взамен операций абразивной обработки [5; 6; 7; 10; 11].

Сегодня основные закономерности процесса резания этими сверхтвердыми материалами (СТМ) раскрыты недостаточно, рекомендации по их применению носят общий или противоречивый характер [14–18]. Некоторые исследователи утверждают, что инструмент из КНБ разрушается путем окисления под воздействием высоких температур в зоне резания [2; 23; 24], другие считают доминирующим процессом микровыкрашивание [25; 27]. Это не позволяет практикам выбрать оптимальные режимы обработки и эффективные технологические решения. Поэтому *целью данной статьи* является исследование процесса точения закаленных сталей резцами из кубического нитрида бора, а *задачей исследования* была выработка на этой базе практических рекомендаций для промышленности.

Методы исследования. Нами рассматривался наиболее важный технологический параметр — стойкость инструмента из гексанида-Р, определяемая длиной пути резания, проходимой резцом до критического затупления режущей части по задней поверхности, принятой как $h_3 = 0,4$ мм. Это значение критического затупления по задней поверхности выработано практикой и рекомендовано многими исследователями. Измерение величины (фаска) износа проводилось с помощью отсчетного микроскопа Бриелля со стороны главной задней поверхности с ценой деления 0,01 мм.

Скорость резания изменяли в пределах $V = 0,6...3,5$ м/с и контролировали периодически путем измерения диаметра штангенциркулем и частоты вращения заготовки с помощью тахометра. Подача и глубина резания во всех экспериментах оставались постоянными и были приняты на основании многих практических рекомендаций и результатов собственных предварительных исследований. Глубина резания $t = 0,25$ мм соответствовала оптимальному припуску на операцию тонкого точения деталей после термообработки с учетом воз-

можного термодорождения. Принятая подача $S = 0,075$ мм/об. соответствовала получению необходимой шероховатости обработанной поверхности деталей на финишных операциях в пределах $Ra 1,25-0,63$ мкм [1].

Испытания проводили на токарно-винторезном станке модели 16К20 с модернизированным приводом главного движения, позволяющим при помощи тиристорной станции с обратной связью БУВ 3501/ТЛ250 производить бесступенчатое изменение частоты вращения шпинделя (коэффициент стабилизации заданных частот вращения $\pm 0,5$ %).

Исходная заготовка была сборной конструкции и состояла из дисков, насаженных на общую оправку. Диски имели толщину, меньшую двух глубин прокаливания, с целью обеспечения постоянного значения твердости по мере срезания с поверхности слоев.

По результатам экспериментов строили графики зависимостей длины пути резания, пройденного резцом до критического износа, от скорости резания. Каждый эксперимент повторяли не менее трех раз, разброс значений не превышал 15 %. Геометрия резцов из гексанида-Р была следующей: $\gamma = -10^\circ$, $\alpha = 12...18^\circ$, $\phi = 45^\circ$, $\phi_1 = 15^\circ$, $\lambda = 6...10^\circ$, $r = 0,3...0,6$ мм.

Твердость заготовок после закалки и периодически в процессе работы контролировали при помощи прибора Роквелла ТК-2М и постоянно (без снятия со станка) твердомером марки EQUO TTP фирмы PROCEG (Швейцария), работающего по методу Шора. На каждом участке проводили 5...7 измерений, результаты которых усредняли, разброс значений не превышал $\pm 1,5$ единиц HRC.

Внешний вид изношенных участков задней поверхности инструментов из КНБ анализировали с помощью растрового электронного микроскопа модели Stereoscan-150 при разных увеличениях (разрешающей способности) $\times 300$ и $\times 3000$.

Образцы предварительно протравливали в азотной кислоте и очищали в спиртовой ванне с наложением ультразвуковых колебаний. Для получения контрастного изображения на поверхность спека из кубического нитрида бора, являющегося диэлектриком, напыляли тонкий (до 3 мкм) слой хрома.

Результаты исследований. Сравнивали стойкость инструмента, работающего в разных условиях — с разными марками сталей, закаленных на разную твердость [14]. Результаты испытаний представлены на рис. 1.

Анализ полученных зависимостей показал, что на операции точения во всех случаях рост скорости резания приводит к снижению стойкости инструмента, но с разной интенсивностью, что особенно ярко проявляется при точении стали 50Г (HRC, 50-52). При точении стали 40ГМФР (HRC, 47-49) и X12M (HRC, 58-60) рост скорости резания в исследуемом диапазоне слабо влияет на изменение стойкости резцов из сверхтвердых материалов [1; 14; 23].

Следует отметить, что стойкость КНБ при резании стали X12M и 9ХС ниже, чем при резании сталей

40ГМФР и 50Г. Этот результат можно объяснить наличием в составе обрабатываемого материала значительного количества хрома (до 1,25 % у стали 9ХС и до 12 % у стали Х12М), стоящего на втором месте в ряду металлов, химически активных к кубическому нитриду бора [9–12]. Влияние скорости резания снижается с ростом процентного содержания этих элементов.

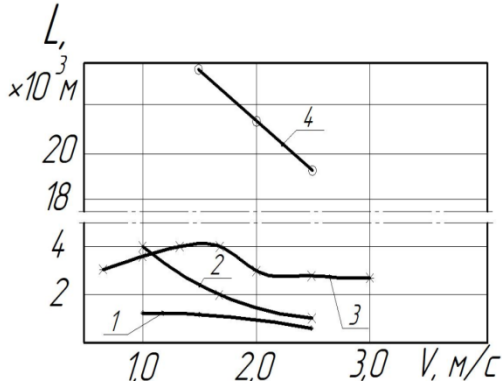


Рис. 1. Влияние скорости на длину пути резания при точении закаленных сталей резцами из гексанита-Р при $S = 0,075$ мм/об., $t = 0,25$ мм: 1 — Х12М (HRC, 58-60); 2 — 9ХС (HRC, 55-58); 3 — 40ГМФР (HRC, 47-49); 4 — 50Г (HRC, 50-52)

В других экспериментах сравнивали резание без подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону резания и при полове различными составами СОЖ — дистиллированной водой, СОЖ с избытком бора (раствор буре) и СОЖ с избытком азота (раствор мочевины).

Два последних состава были приняты исходя из предположения, что избыток в окружающей среде компонентов матрицы (в нашем случае кубический нитрид бора содержит бор и азот) будет блокировать выход бора или азота из поликристаллического спека и снизит деструкцию инструментального материала (рис. 2).

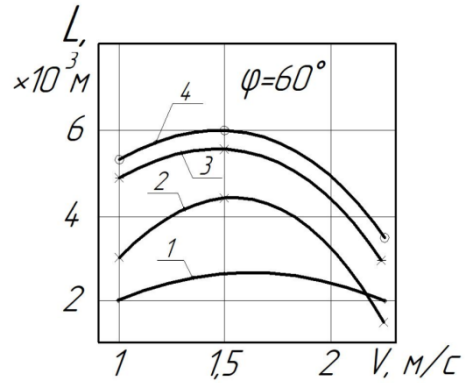


Рис. 2. Влияние скорости на длину пути резания при точении резцами из гексанита-Р стали 50Г (HRCэ 50-52) при $S = 0,075$ мм/об., $t = 0,3$ мм: 1 — без СОЖ; 2 — вода дистиллированная; 3 — раствор буре; 4 — раствор мочевины

Анализ результатов экспериментов показал, что смазочно-охлаждающие жидкости оказывают значительное влияние на темп и характер изнашивания инструментов из КНБ. При точении закаленных сталей позитивное влияние подачи СОЖ в зону резания заключается в уменьшении теплонапряженности процесса. Это, вероятно, достигается созданием разделительных смазочных пленок и экранизации процессов взаимодействия контртел и, как следствие, снижением коэффициента трения [18–22]. Предположение о положительном влиянии избытка компонентов инструментального материала (бор и азот) в составе СОЖ подтверждается увеличением стойкости резцов из КНБ во всем исследованном скоростном диапазоне.

Для подтверждения наших предположений о преобладающем характере износа мы проанализировали внешний вид изношенной задней поверхности инструмента из кубического нитрида бора, полученный с помощью электронной микроскопии (рис. 3).

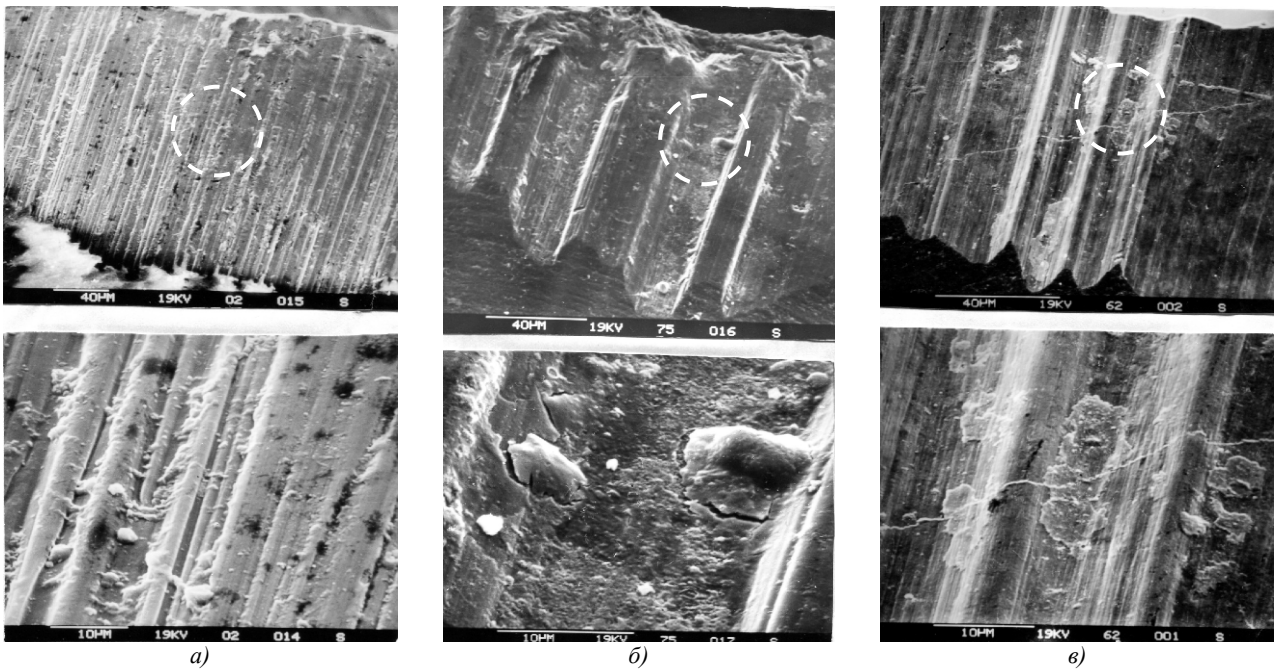


Рис. 3. Внешний вид поверхности износа резцов из КНБ при точении стали 50Г (HRCэ 50-52) при а) $V = 1,0$ м/с; б) $V = 1,5$ м/с; в) $V = 2,5$ м/с (верхний снимок $\times 300$, нижний снимок — выделенная пунктиром зона $\times 3000$)

Руководствуясь традиционной классификацией видов износа, определенных Т.Н. Лоладзе и другими исследователями [2; 26; 27], мы определили, что на низких скоростях ($V = 1,0$ м/с) преобладающим видом является адгезионный износ (рис. 3а). С ростом скорости обработки до $V = 1,5$ м/с и повышением температуры в зоне резания адгезионные процессы ослабевают, возрастает влияние химического износа (наличие пилообразных проточин) (рис. 3б). При увеличении скорости резания до 2,5 м/с следы адгезионного взаимодействия минимальны, термическая деструкция вследствие вы-

сокой температуры приводит к превалированию химического износа (рис. 3в).

Таким образом, зная характер превалирующих в зоне резания процессов износа, можно предусмотреть корректирующие воздействия и управлять темпом изнашивания инструментов из кубического нитрида бора и производительностью операций лезвийной обработки закаленных сталей. Для исследованных условий можно рекомендовать следующий режим лезвийной обработки: $V = 1,5$ м/с, $S = 0,075$ мм/об., $t = 0,25–0,5$ мм с применением смазочно-охлаждающих жидкостей.

Литература

1. Гартфельдер В.А. Физико-технологические особенности процесса точения конструкционных материалов инструментами из СТМ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Куйбышев, 1990. 23 с.
2. Белозёров В.А., Силич А.А., Утешев М.Х. Термомеханическая модель процесса тонкого точения жаропрочных сплавов инструментами из СТМ // Изв. вузов. Нефть и газ. 2014. № 4. С. 91–94.
3. Кисель А.Г., Реченко Д.С. Оценка технологической эффективности смазочно-охлаждающих жидкостей при лезвийной обработке // Механика XXI века: материалы XII Всерос. науч.-технической конф. с междунар. участием / БрГУ. Братск, 2013. С. 160, 161.
4. Богатырева Г.П., Бурыкин В.В., Гаргин В.В. Инструменты из сверхтвердых материалов. М.: Машиностроение, 2014. 608 с.
5. Инструменты из сверхтвердых материалов [Электронный ресурс] / под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. М.: Машиностроение, 2014. 608 с. URL: <http://www.studmedlib.ru/book/ISBN9785942757038.html> (дата обращения: 06.09.2019).
6. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Ереско С.П. Качество поверхности твердого сплава при комбинированном электроалмазном шлифовании с непрерывной правкой круга // Научно-технические технологии в машиностроении. 2012. № 5. С. 26–31.
7. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Влияние методов затачивания на качество твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов // Вестн. машиностроения. 2011. № 3. С. 50–53.
8. Скрипняк В.В., Лобанов Д.В., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С. Моделирование напряженно-деформированного состояния в пластине из композиционного материала (WC-Co) при алмазном затачивании // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2013. № 4 (24). С. 99–110.
9. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов: моногр. Старый Оскол: ТНТ, 2012. 296 с.
10. Секлетина Л.С., Медведева О.И., Гартфельдер В.А., Янюшкин А.Р. Формирование поверхностных пленок при шлифовании твердых сплавов кругами на токопроводящих связках // Наука и техника Казахстана. 2018. № 3. С. 96–106.
11. Янюшкин А.С. Технология электроалмазного затачивания режущих инструментов и методы её реализации: моногр. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2013. 336 с.
12. Архипов П.В., Балыков А.В., Дьяконов А.А., Еренков О.Ю., Иванов В.П., Янюшкин А.С. Эффективные технологии механической обработки деталей из неметаллических материалов: кол. монография. М.: Изд. дом «Спектр», 2014. 255 с.
13. Артамонов Е.В., Помигалова Т.Е., Тверяков А.М., Утешев М.Х. Механика разрушения и прочность сменных режущих пластин из твердых сплавов. Тюмень: ТюмГНТУ, 2013. 148 с.
14. Башков В.М., Кацев П.Г. Испытание режущего инструмента на стойкость. М.: Машиностроение, 1985. 136 с.
15. Гартфельдер В.А., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Секлетина Л.С. Физико-химическое взаимодействие кубического нитрида бора с железоуглеродистыми сплавами // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: материалы III Междунар. науч.-практической конф. Братск, 2017. С. 134–139.
16. Popov V.Y., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Y.I. Diffusion Phenomena in the Combined Electric Diamond Grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 799-800. P. 291–298.
17. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Ivancivsky V.V. Contact processes in grinding // Applied mechanics and materials. 2015. Vol. 788. P. 17–21.
18. Popov V.Y., Yanyushkin A.S. Adhesion-Diffusion Interaction of Contact Surfaces with the Treatment Diamond Grinding Wheels // Eastern European Scientific Journal. 2014. Vol. 2. P. 301–310.
19. Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., N.A. Saprykina N.A. Mechanism of Protective Membrane Formation on the Surface of Metal-Bonded Diamond Disks // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 682. P. 327–331.
20. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Surface Quality of the Fiberglass Composite Material after Milling // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 682. P. 183–187.
21. Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Petrushin S.I. The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 379. P. 124–130.
22. Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Гартфельдер В.А., Стрельников И.А. Влияние фосфатоборатных соединений на противокоррозионную устойчивость углеродистой стали в нейтральных водных средах // Черные металлы. 2018. № 5. С. 47–53.
23. Гартфельдер В.А., Янюшкин А.С., Секлетина Л.С., Янюшкин А.Р. Исследование зоны контакта при точении стали X12M минералокерамикой ВОК-71 // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та 2019. № 3. С. 28–33.
24. Бочко А.В., Лавренко В.А., Примачук В.Л., Проценко Т.Г. Окисление поликристаллов гексанида-Р различного фазового состава // Сверхтвердые материалы. 1986. № 1. С. 16–18.
25. Железнов Г.С., Сингеев С.А. Исследование стойкости разверток, оснащенных поликристаллами эльбора-Р // Алмазы и сверхтвердые материалы. 1982. № 3. С. 9–11.

26. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.
27. Ардашев Д.В. Основные механизмы износа абразивного зерна // Современные фундаментальные и прикладные исследования. 2013. № 4. С. 40–43.

References

1. Gartfel'der V.A. Physical and technological features of the process of turning structural materials with STM tools: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk. Kujbyshev, 1990. 23 p.
2. Belozorov V.A., Silich A.A., Uteshev M.H. Thermomechanical model of the process of fine turning of heat-resistant alloys with STM tools // Higher Educational Institutions News Neft' i Gas . 2014. № 4. P. 91–94.
3. Kisel' A.G., Rechenko D.S. Evaluation of technological efficiency of cutting fluids for blade processing // Mekhaniki XXI veku: materialy XII Vseros. nauch.-tekhnicheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem / BrGU. Bratsk, 2013. P. 160–161.
4. Bogatyreva G.P., Burykin V.V., Gargin V.V. Tools made of super-solid materials. M.: Mashinostroenie, 2014. 608 p.
5. Tools made of super-solid materials [Elektronnyj resurs] / pod red. N.V. Novikova, S.A. Klimenko. M.: Mashinostroenie, 2014. 608 p. URL: <http://www.studmedlib.ru/book/> ISBN 9785942757038.html (data obrashcheniya: 06.09.2019).
6. YAnyushkin A.S., Arhipov P.V., Eresko S.P. Hard alloy surface quality in combined electro-diamond grinding with continuous circle edging // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2012. № 5. P. 26–31.
7. Lobanov D.V., YAnyushkin A.S. Influence of sharpening methods on the quality of carbide tools for processing composite materials // Russian Engineering Research. 2011. № 3. P. 50–53.
8. Skripnyak V.V., Lobanov D.V., Skripnyak V.A., YAnyushkin A.S. Modeling the stress-strain state in a composite material plate (WC – Co) during diamond sharpening // Toms State University Journal of Mathematics and Mechanics. 2013. № 4 (24). P. 99–110.
9. Lobanov D.V., YAnyushkin A.S. Technology of tool support for production of products made of composite non-metallic materials: monogr. Staryj Oskol: TNT, 2012. 296 p.
10. Sekletina L.S., Medvedeva O.I., Gartfel'der V.A., YAnyushkin A.R. Formation of surface films when grinding hard alloys in circles on conductive bundles // Nauka i tekhnika Kazhstana. 2018. № 3. P. 96–106.
11. YAnyushkin A.S. Technology of electro-diamond sharpening of cutting tools and methods of its implementation: monogr. Staryj Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii, 2013. 336 p.
12. Arhipov P.V., Balykov A.V., D'yakov A.A., Erenkov O.YU., Ivanov V.P., YAnyushkin A.S. Effective technologies for machining parts made of non-metallic materials: kol. monografiya. M.: Izd. dom «Spektr», 2014. 255 p.
13. Artamonov E.V., Pomigalova T.E., Tveryakov A.M., Uteshev M.H. Fracture mechanics and strength of replaceable cutting plates made of hard alloys. Tyumen': TyumGNTNGU, 2013. 148 p.
14. Bashkov V.M., Kacev P.G. Test the cutting tool on the resistance. M.: Mashinostroenie, 1985. 136 p.
15. Gartfel'der V.A., Lobanov D.V., YAnyushkin A.S., Sekletina L.S. Physical and chemical interaction of cubic boron nitride with iron-carbon alloys // Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii i litejnom proizvodstve: materialy III Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. Bratsk, 2017. P. 134–139.
16. Popov V.Y., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Y.I. Diffusion Phenomena in the Combined Electric Diamond Grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 799-800. P. 291–298.
17. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Ivancivsky V.V. Sontact processes in grinding // Applied mechanics and materials. 2015. Vol. 788. P. 17–21.
18. Popov V.Y., Yanyushkin A.S. Adhesion-Diffusion Interaction of Contact Surfaces with the Treatment Diamond Grinding Wheels // Eastern European Scientific Journal. 2014. Vol. 2. P. 301–310.
19. Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., N.A. Saprykina N.A. Mechanism of Protective Membrane Formation on the Surface of Metal-Bonded Diamond Disks // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 682. P. 327–331.
20. Yuanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Surface Quality of the Fiberglass Composite Material after Milling // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 682. P. 183–187.
21. Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Petrushin S.I. The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 379. P. 124–130.
22. Illarionov I.E., Sadetdinov SH.V., Gartfel'der V.A., Strel'nikov I.A. Effect of phosphate reverse compounds on the anticorrosive stability of carbon steel in neutral water environments // Chernye metally. 2018. № 5. P. 47–53.
23. Gartfel'der V.A., YAnyushkin A.S., Sekletina L.S., YAnyushkin A.R. Investigation of the contact zone when turning h12m steel of VOK-71 mineral ceramics // Bulletin BSTU. 2019. № 3. P. 28–33.
24. Bochko A.V., Lavrenko V.A., Primachuk V.L., Procenko T.G. Oxidation of hexanite-P polycrystals of different phase composition // Journal of Superhard Materials. 1986. № 1. P. 16–18.
25. ZHeleznov G.S., Singeev S.A. The study of stability of the scan, equipped with polycrystalline cubic-P // Almazy i sverhtverdye materialy. 1982. № 3. P. 9–11.
26. Loladze T.N. Strength and wear resistance of the cutting tool. M.: Mashinostroenie, 1982. 320 p.
27. Ardashev D.V. The main wear mechanisms of abrasive grain // Modern fundamental and applied researches. 2013. № 4. P. 40–43.