

УДК 621.762

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-104-109

Твердосплавный режущий инструмент с покрытием из нитрида кремния

© 2018 г. В.С. Панов

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 29.05.18 г., доработана 09.06.18 г., подписана в печать 13.06.18 г.

Приведена технология получения износостойкого покрытия из нитрида кремния на твердосплавном режущем инструменте. Рассмотрены факторы, влияющие на структуру и толщину покрытия. Дан обзор отечественных и зарубежных работ по свойствам и областям применения твердых сплавов в качестве режущего, бурового, штампового инструментов, износостойких материалов, для бесстружковой обработки материалов, древесины, пластмасс. Отмечено, что одним из основных путей совершенствования режущего инструмента является использование многогранных неперетачиваемых пластин с износостойким покрытием. Обоснована причина выбора нитрида кремния в качестве материала покрытия для твердосплавного инструмента. Представлены данные по методам нанесения покрытия из нитрида кремния, исследованию структуры и свойств режущего инструмента. Лабораторные и заводские испытания режущего инструмента с покрытием из нитрида кремния показали целесообразность применения последнего для повышения стойкости и срока службы режущих пластин.

Ключевые слова: структура, покрытия, газовая фаза, свойства, резец, стойкость, испытания.

Панов В.С. – докт. техн. наук, профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр.-т, 4). E-mail: zeinalova@rambler.ru.

Для цитирования: Панов В.С. Твердосплавный режущий инструмент с покрытием из нитрида кремния. *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия*. 2018. No. 4. С. 104–109. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-104-109.

Panov V.S.

Cemented carbide cutting tools coated with silicon nitride

The paper describes the technology of producing a wear resistant silicon nitride coating on cemented carbide cutting tools and factors affecting its structure and thickness. A review of domestic and foreign authors' works is given on the properties and applications of cemented carbides in cutting, drilling, die stamping tools, wear resistant materials, for chipless processing of wood, plastics. It is noted that one of the promising ways of cutting tool development is using indexable throwaway inserts (ITI) with wear resistant coatings. The choice of silicon nitride as a material for cemented carbide tool coating is justified. The data on silicon nitride deposition methods, investigation of cutting tool structures and properties are provided. Laboratory and factory tests of Si_3N_4 -coated cemented carbide tools demonstrated coating applicability in improving the wear resistance and lifetime of cutting inserts.

Keywords: structure, coatings, gas phase, properties, cutting tool, wear resistance, tests.

Panov V.S. – Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of powder metallurgy and functional coatings, National University of Science and Technology «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: zeinalova@rambler.ru.

Citation: Panov V.S. Cemented carbide cutting tools coated with silicon nitride. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2018. No. 4. P. 104–109 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-104-109.

Введение

Тугоплавкие соединения, структуру, свойства и технологию которых исследовал Г.В. Самсонов [1–4], являются основой спеченных твердых сплавов.

Твердые сплавы в современной технике имеют большое значение, так как применяются в качестве износостойких материалов режущего, бурового и штампового инструментов [5–18]. В настоящее

время, по данным [16], во всем мире производится порядка 50–60 тыс. т твердых сплавов, которые используются в следующих отраслях, %: металлообработка — 22, обработка дерева и пластмасс — 20, износостойкие детали — 17, горнодобывающая промышленность — 26, бесстружковая обработка — 9. Анализ отечественной и зарубежной литературы [19–37], посвященной твердым сплавам,

позволяет сделать вывод об интенсивном развитии работ, направленных на повышение их свойств.

Один из основных путей дальнейшего развития и совершенствования твердосплавного режущего инструмента связан с использованием многогранных неперетачиваемых пластин (МНП) с износостойкими покрытиями. Эффективность применения МНП во многом определяется материалом покрытия [38–49]. Единые требования к свойствам материалов покрытий окончательно еще не разработаны, что обусловлено неполным знанием механизмов износа и процессов, происходящих при резании.

Основное требование к материалу покрытия — высокая износостойкость, но это понятие определяется многими показателями: рабочая температура, коэффициент трения при резании, твердость, взаимодействие с кислородом и обрабатываемым материалом, сцепление с основой. Ни один из большого количества применяемых сейчас материалов не удовлетворяет полностью требованиям, предъявляемым к материалу покрытия. Поэтому работы в данном направлении продолжают.

В настоящей работе в качестве покрытия был выбран нитрид кремния (Si_3N_4), который по основным свойствам отвечает материалу покрытия. Это высокотемпературный материал, обладающий комплексом ценных химических, физических и механических свойств [4, 39], обуславливающих целесообразность его использования в качестве износостойкого покрытия.

Целью работы являлось совершенствование технологии нанесения покрытий из нитрида кремния, исследование его структуры и свойства.

Методика проведения экспериментов и исследований

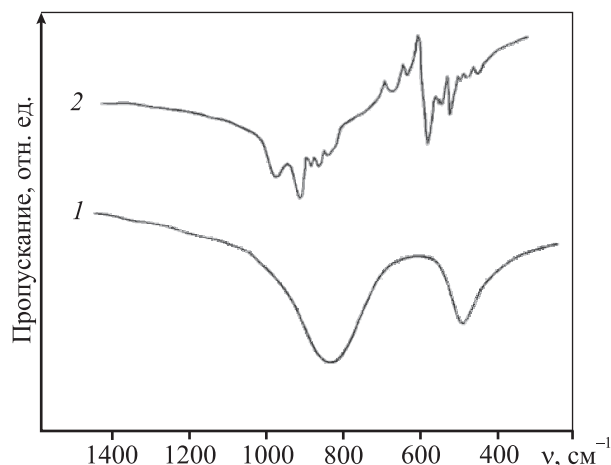
Настоящая работа является продолжением исследований, приведенных в [39]. В качестве исходных материалов использовали сплавы МС 321 и МС 146 производства «МКТС-САНДВИГ» (г. Москва). Для нанесения выбран нитрид кремния, который в какой-то мере по химическим, физическим и механическим свойствам отвечает износостойкому материалу. Покрытие Si_3N_4 получали газофазным осаждением [6, 50] по реакции аммонолиза тетрахлорида кремния на твердосплавные резцы. На процесс осаждения влияют такие факторы, как температура, продолжительность осаждения, скорость потока реагентов и соотношение между

ними. Скорость осаждения и толщину покрытия оценивали по изменению массы образца в единицу времени на единицу площади поверхности резца. Оптимальным оказался следующий режим: температура $800 \pm 20^\circ\text{C}$, соотношение $\text{Si}_3\text{N}_4 : \text{NH}_3 = 8 : 1$, разрежение в реакционной камере $(0,1 \div 4,0) \pm \pm 0,06$ кПа, толщина покрытия 5–8 мкм. Дифрактограммы покрытий были получены с использованием CuK_α -излучения на установке ДРОН-3 (НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург), их расшифровка проводилась по стандартной методике.

Результаты и их обсуждение

Для определения структуры и состава покрытия был проведен рентгеноструктурный анализ. Дифрактограммы, полученные как непосредственно с образцов, так и с отделенных от основы покрытий, не имели рефлексов $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ (см. рисунок). Это указывает на то, что осажденное покрытие является либо аморфным, либо очень мелкозернистым.

С помощью дифференциального термического анализа установлено, что при нагревании материала покрытия до $t = 1350^\circ\text{C}$ он не подвергается каким-либо изменениям. Полученные данные свидетельствуют о том, что при исследуемых условиях нанесения нитрид кремния осаждается на твердосплавные резцы, вероятно, в аморфном состоянии. Основным фактором, приводящим к осаждению аморфного покрытия, является сравнительно низкая температура подложки, что обеспечивает условия, при которых скорость кристаллизации ниже, чем скорость осаждения нитрида кремния.



Инфракрасные спектры

1 — покрытие, полученное при $t = 800^\circ\text{C}$
2 — кристаллический Si_3N_4 [51]

Что касается механизма зародышеобразования, то в данном случае можно предположить следующее. При нагреве SiCl_4 с NH_3 образуются промежуточные соединения типа SiNH_2Cl_3 , $\text{Si}(\text{NH}_2)\text{Cl}_2$ и другие полимерные молекулы с большой массой [51]. Из них последовательно удаляются группы HCl , а состав комплексов приближается к Si_3N_4 . Последняя стадия реакции образования нитрида кремния происходит вблизи поверхности подложки как наиболее горячей зоны, где создается наибольшее пересыщение газовой фазы; в этой зоне формируются зародыши, которые адсорбируются поверхностью подложки.

Для оценки режущих свойств были взяты многогранные неперетачиваемые пластины 4 видов: без покрытия; с покрытием Si_3N_4 ; с покрытием $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiC}$; с покрытием TiC (для сравнения).

Для оценки действия отдельных механизмов износа при резании и влияния на его интенсивность нанесенного на поверхность резца покрытия нитрида кремния проводили эксперименты, в которых имитировались процессы, приводящие к износу режущей кромки резца. При резании температура достигает более 1000°C , за счет чего имеет место активное взаимодействие твердого сплава с окружающей атмосферой, что приводит к образованию оксидной пленки. Эффективную защиту от окислительного износа может обеспечить покрытие с высокой стойкостью к окислению. Наибольшую стойкость к окислению показали

пластины, покрытые нитридом кремния с подслоем карбида титана толщиной 2–3 мкм. В экспериментах по изучению диффузии между твердосплавными пластинами и чугуном были получены концентрационные кривые распределения W, Co, Fe, C. Покрытие нитрида кремния толщиной 8–10 мкм полностью предотвращает взаимную диффузию между твердым сплавом и чугуном.

Возникновению метастабильной аморфной структуры при конденсации нитрида кремния способствует сильная ковалентная связь $\text{Si}-\text{N}$ в молекуле Si_3N_4 . Она обеспечивает энергетический минимум потенциала взаимодействия, в основном присоединением ближайших соседей. Амorfизации может также благоприятствовать наличие примесных атомов, осложняющих возможность перестройки структуры в кристаллическую.

Адгезионное взаимодействие со сталью, проявляющееся в явлении схватывания инструмента и обрабатываемого материала, оценивали по интенсивности взаимодействия, которую можно охарактеризовать величиной коэффициента трения, возникающего между инструментом и обрабатываемой деталью [52]. Результаты измерений приведены в табл.1.

Исследования прочности сцепления покрытия с основой проводили с помощью микроанализатора «Сомеса» (Франция) по концентрационным кривым распределения элементов [37]. Результаты позволили сделать вывод, что между покрытием из нитрида кремния и основой имеет место чисто адгезионное взаимодействие. Его прочность, определенная по методу скользящего индентора, оказалась зависимой от толщины покрытия. Максимальная сила адгезии составляла 0,41 Н (42 г) при толщине покрытия 6–8 мкм.

Для оценки режущих свойств МНП были осу-

Таблица 1. Коэффициент трения по стали

Материал резца	Коэффициент трения
Твердый сплав	1,55
Твердый сплав с TiC	1,32
Твердый сплав с Si_3N_4	0,96

Таблица 2. Результаты испытаний твердых сплавов с износостойкими покрытиями

Материал МНП	Обрабатываемый материал	Износ, мм	Стойкость, мин	Коэффициент стойкости
MC-321	Чугун	0,8	11,4	1,0
MC-321 + Si_3N_4		0,8	35,8	3,1
MC-321 + TiC + Si_3N_4		0,8	60,0	5,1
MC-321 + TiC		0,8	21,0	1,9
MC-146	Сталь 50	0,8	18,0	1,0
MC-146 + Si_3N_4		0,8	53,3	2,8
MC-146 + TiC + Si_3N_4		0,8	99,6	5,0
MC-146 + TiC		0,8	37,5	1,9

Таблица 3. Результаты заводских испытаний МНП из сплава МС-321

№ опыта	Стойкость, мин	Средний износ, мм	Коэффициент стойкости	Режим резания
Покрытие Si ₃ N ₄				
1	50,1	0,85	1,68	Скорость – 85 м/мин Подача – 0,3 об/мин Глубина – 5,0 мм
2	53,8	0,73	1,72	
3	53,0	0,80	1,70	
4	54,0	0,69	1,72	
5	57,0	0,67	1,89	
Без покрытия				
1	30,0	0,90	1,0	
2	31,8	1,60	1,0	
3	30,5	1,35	1,0	
Примечание. Обрабатываемый материал – серый чугун СЧ-32-52 (230–250 НВ).				

Таблица 4. Режущие свойства МНП из сплава МС-321

№	Покрытие	Стойкость, мин	Износ, мм	Коэффициент стойкости	Режим резания
1	Без покрытия	7,6	0,81	1,0	Скорость – 150 м/мин Подача – 0,2 об/мин Глубина – 1,0 мм
2	TiC	19,5	0,50	2,6	
3	Si ₃ N ₄	29	0,55	3,75	
4	Si ₃ N ₄ + TiC	30	0,53	3,85	
1	Без покрытия	6,0	0,5	1,0	Скорость – 200 м/мин
2	Si ₃ N ₄	14,5	0,5	2,1	Подача – 0,2 об/мин
3	TiC	13,0	0,5	2,0	Глубина – 2,0 мм
Примечание. Обрабатываемый материал – серый чугун СЧ-32-52.					

шествлены испытания в соответствии с методикой, изложенной в ОСТ-48-99-76 [33]. Толщина подслоя из TiC составляла 3–4 мкм. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

По договоренности с инструментальными предприятиями Подмосковья и ВНИИТС (г. Москва) были проведены испытания режущих свойств МНП с покрытиями, результаты которых приведены в табл. 3, 4.

Заключение

Проведенные исследования показали, что покрытия из нитрида кремния на твердом сплаве являются аморфными. Структурное состояние покрытия зависит от режимов осаждения. Результаты испытаний режущих свойств резцов с покрытиями свидетельствуют о возможности их использования при обработке резанием различных деталей из серого чугуна и сталей.

Литература/References

1. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия. М.: Металлургия, 1973.
Samsonov G.V., Epik A.P. Refractory coating. Moscow: Metallurgiya, 1973 (In Russ.).
2. Самсонов Г.В., Виноцкий И.М. Тугоплавкие соединения. М.: Металлургия, 1976.
Samsonov G.V., Vinitskii I.M. Refractory compounds. Moscow: Metallurgiya, 1976 (In Russ.).
3. Самсонов Г.В., Кулик О.П., Полищук В.С. Получение и методы анализа нитридов. Киев: Наук. думка, 1978.
Samsonov G.V., Kulik O.P., Polishchuk V.S. Nitrides production and analysis methods. Kiev: Nauk. dumka, 1978 (In Russ.).
4. Самсонов Г.В., Дворина П.А., Рудь Б.Н. Силициды. М.: Металлургия, 1979.
Samsonov G.V., Dvorina P.A., Rud' B.N. Silicides. Moscow: Metallurgiya, 1979 (In Russ.).
5. Третьяков В.И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1976.

- Tret'yakov V.I.* Basic metallurgical science and sintered cemented carbides production technology. Moscow: Metallurgiya, 1976 (In Russ.).
6. *Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.В.* Технология и свойства твердых сплавов и изделий из них. М.: МИСиС, 2004.
Panov V.S., Chuvilin A.M., Fal'kovskii V.V. Technology and properties of sintered cemented carbides and its products. Moscow: MISIS, 2004 (In Russ.).
7. *Kolaska H.Y.* The dawn of the hard metal age. *Powder Metall. Int.* 1992. Vol. 24. P. 311—314.
8. *Фальковский В.А.* Теоретические основы твердых сплавов для обработки металлов: Автореф. дис. ... док. техн. наук. М.: МИСиС, 1997.
Fal'kovskii V.A. Fundamentals of cemented carbides production for metal processing: Abstract of a thesis of the dissertation of Dr. Sci. (Tech.). Moscow: MISIS, 1997 (In Russ.).
9. *Левашиов Е.А., Рогачев А.С., Курбаткина В.В.* Перспективные материалы и технологии для изделий, полученных самораспространяющимся высокотемпературным синтезом. М.: МИСиС, 2011.
Levashov E.A., Rogachev A.S., Kurbatkina V.V. Promising materials and technologies for SHS products. Moscow: MISIS, 2011 (In Russ.).
10. *Лошак М.Г.* Прочность и долговечность твердых сплавов. Киев.: Наук. думка, 1984.
Loshak M.G. Strength and durability of hardmetals. Kiev: Nauk. dumka, 1984 (In Russ.).
11. *Panov V.S.* Occurrence and way of development of manufacture of domestic hard alloy products. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2018. Vol. 9. P. 693—698.
12. *Раковский В.С., Самсонов Г.В., Ольхов И.И.* Основы производства твердых сплавов. М.: Metallurgizdat, 1960.
Rakovskii V.S., Samsonov G.V., Ol'khov I.I. The principles of cemented carbides production. Moscow: Metallurgizdat, 1960 (In Russ.).
13. *Самсонов Г.В., Витрянюк О.К.* Современное состояние и перспективы развития твердых сплавов. Киев: Наук. думка, 1971.
Samsonov G.V., Vitryanyuk O.K. The modern state of art and future development of cemented carbides. Kiev: Nauk. dumka, 1971 (In Russ.).
14. *Панов В.С., Еремеева Ж.В., Ниткин Н.Н.* Технология, свойства, области применения отечественных твердых сплавов. М.: Московский политех, 2017.
Panov V.S., Eremeeva Zh.V., Nitkin N.N. Technology, properties, fields of application of domestic manufactured cemented carbides. Moscow: Moskovskii politekh, 2017 (In Russ.).
15. *Панов В.С.* Г.А. Меерсон — основоположник производства отечественных твердых сплавов и порошковой быстрорежущей стали. *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2001. No. 6. С. 40—45.
Panov V.S. G.A. Meerson is an establisher of the production of domestic hard alloys and powder high-speed steels. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya.* 2001. No. 6. P. 40—46 (In Russ.).
16. *Williams B.* Powder metallurgy: A global market review. In: *International powder metallurgy.* 15th ed. UK: Innorar communications Ltd., 2012.
17. *Жидовцев Н.А., Кершенбаум В.Я., Гинзбург Э.С., Бикбулатов И.К., Бородин Е.Н.* Долговечность шарошечных долот. М.: Недра, 1992.
Zhidovtsev N.A., Kershenbaum V.Ya., Ginzburg E.S., Bikbulatov I.K., Borodina E.N. Drilling bit lifetime. Moscow: Nedra, 1992 (In Russ.).
18. *Захаров Д.А.* Совершенствование состава, структуры, технологии и применения твердых сплавов в производстве буровых долот: Авторефер. ... дис. канд. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2014.
Zakharov D.A. The modifying of composition, structure, technology and working regimes of cemented carbides used in drilling bit production: Abstract of the dissertation of PhD. Samara: SamGTU, 2014 (In Russ.).
19. *Креймер Г.С.* Прочность твердых сплавов. М.: Металлургиздат, 1971.
Kreimer G.S. The strength of cemented carbides. Moscow: Metallurgizdat, 1971 (In Russ.).
20. *Фельковский В.А., Клячко Л.И.* Твердые сплавы. М.: Руда и металлы, 2005.
Fel'kovskii V.A., Klyachko L.I. Cemented carbides. Moscow: Ruda i metally, 2005 (In Russ.).
21. *Бондаренко В.П., Гнатенко И.А.* Перспективы управления процессом формирования скелета в твердых сплавах WC—Co. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент: Сб. матер. 14 Междунар. конф. (г. Киев, 15—22 сент. 2011 г.). Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2011. С. 423—437.
Bondarenko V.P., Gnatenko I.A. The aspects of skeleton structure formation process management in cemented carbides. In: *Rock-cutting and metal-working tool: The collection of materials of the 14 Intern. conf.* (Kiev, 15—22 Sept. 2011). Kiev: ISM n.a. V.N. Bakul, 2011. P. 423—437 (In Russ.).
22. *Бабищ М.М.* Неоднородность твердых сплавов по содержанию углерода и ее устранение. Киев: Наук. думка, 1975.
Babich M.M. Carbon concentration inhomogeneity of cemented carbides and its elimination. Kiev: Nauk. dumka, 1975 (In Russ.).
23. *Ковальченко М.С., Самсонов Г.В.* Горячее прессование. Киев: Гостехиздат, 1962.
Koval'chenko M.S., Samsonov G.V. Hot pressing. Kiev: Gostekhizdat, 1962 (In Russ.).
24. *Кудря Н.А., Гаврилин В.М.* Разработка конструкции долотовых коронок для бурения горных пород. *Твердые сплавы и тугоплавкие металлы.* М.: Металлургия, 1973. No. 14. С. 152—158.
Kudrya N.A., Gavrilin V.M. Drilling bits for rock materials construction design. In: *Hard alloys and refractory metals.* Moscow: Metallurgiya, 1973. No. 14. P. 152—158 (In Russ.).
25. *Ивенсен В.А.* Кинетика уплотнения металлических порошков при спекании. М.: Металлургия, 1971.

- Ivensen V.A. Sintering shrinkage kinetics for metallic powders. Moscow: Metallurgiya, 1971 (In Russ.).
26. Чапорова И.Н., Чернявский К.С. Структура спеченных твердых сплавов. М.: Metallurgiya, 1975.
Chaporova I.N., Chernyavskii K.S. The structure of sintered cemented carbides. Moscow: Metallurgiya, 1975 (In Russ.).
27. Schwarzkopf P., Kieffer R. Refractory hard metals. N.Y.: Mac Millan, 1953.
28. Kieffer R., Benesovsky F. Hartmetalle. Berlin: Springer-Verlag, 1965.
29. Gurland J. An estimate of contact and continuite of dispersions in opaque samples. *AIME. Met. Soc. Trans.* 1966. Vol. 236 (5). P. 642—646.
30. Dawihl W.A. Microstructure evolution the cemented carbides WC—Co: Handbook of hard metals. London: H.M. Stationary Office, 1955.
31. Suzuki H., Hayashi K. The beta-free lasser near the surface of vacuum — sintered tungsten carbide-beta-Co alloys containing nitrogen. *Planseeber. Pulvermet.* 1966. Bd. 14. No. 2. S. 96—109.
32. Amman E., Hennuber M. Cemented carbide body used preferably for rock drilling and mineral cutting. *Stahl and Eisen.* 1951. Bd. 71. S. 1080—1090.
33. Трент Е.М. Экспресс-информ. ВИНТИ. Сер. Режущие инструменты. 1971. No. 2. С. 21—28.
Trent E.M. Express information of VINITI University. Chapt. Cutting tools. 1971. No. 2. P. 21—28 (In Russ.).
34. Exner H.E., Gurland J.E. Role of the binder phase in cemented tangsten carbide-cobalt alloys. *J. Mater.* 1970. Vol. 5. P. 75—80.
35. Grime H., Kolaska J. Heinrich weidenfeld erzanlt (in German). *Metall.* 1978. Bd. 32. S. 989—993.
36. Gee M.G. Hard metals microstructural design. In: *Proc. 15th Intern. pleansee seminar* (Vienna, Austria, 21—26 Sept. 2001). Vol. 4. P. 245—266.
37. Froschauer L., Fulrath R.M. Direct observation of liquid-phase sintering in the system tangsten carbide-cobalt. Report No. LBL-3189. 1974.
38. Кирюханцев-Корнеев Ф.В. Разработка твердых износостойких покрытий в системах Ti—Si—N, Ti—B—N, Cr—B—N, Ti—Cr—B—N: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. М.: МИСиС, 2004.
Kiryukhantsev-Korneev F.V. The designing of hard, wear resistant coatings in Ti—Si—N, Ti—B—N, Cr—B—N, Ti—Cr—B—N systems: Abstract of the dissertation of PhD. Moscow: MISIS, 2004 (In Russ.).
39. Панов В.С., Шуменко В.Н. Покрытие из нитрида кремния на твердосплавный режущий инструмент. *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия.* 2012. No. 2. С. 67—70.
Panov V.S., Shumenko V.N. Silicon nitride coating for cemented carbide tools. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya.* 2012. No. 2. P. 67—70 (In Russ.).
40. Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Левашов Е.А., Штанский Д.В. Наноструктурные покрытия Ti—Cr—B—N для твердосплавного режущего инструмента. *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия.* 2010. No. 2. С. 39—46.
Kiryukhantsev-Korneev F.V., Levashov E.A., Shtanskii D.V. Nanostructured Ti—Cr—B—N coatings for cemented carbide cutting tool. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya.* 2010. No. 2. P. 39—46 (In Russ.).
41. Konyashin I., Anikeev A., Senchihin V. Development, production and application of novel grades of coated hard-metals in Russia. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 1996. Vol. 14. P. 41—48.
42. Konyashin I. PVD/CVD Technology for coating cemented carbides. *Surf. Coat. Technol.* 1995. Vol. 71. P. 277—283.
43. Konyashin I. Thin TiC_x films chemically vapor deposited onto cemented carbides from the 278TiCl₄—CH₄—H₂ mixture. *Thin Solid Films.* 1996. Vol. 278. P. 37—44.
44. Konyashin I. PVD/CVD Technology for coating cemented carbides. *Surf. Coat. Technol.* 1996. Vol. 53. P. 259—265.
45. Lessiak M., Haubner R. Diamond coatings on hardmetal substrates with CVD coatings as intermediate layers. *Surf. Coat. Technol.* 2013. Vol. 230. P. 119—123.
46. Guseva M., Babaev V., Khvostov V. High quality diamond films on WC—Co surfaces. *Diamond Relat. Mater.* 1997. Vol. 6. P. 89—94.
47. Pogozhev Yu.S., Potanin A.Yu., Levashov E.A., Kochevov N.A., Kovalev D.Yu., Rogachev A.S. SHS of TiC—TiNi composites: Effect of Initial temperature and nanosized refractory additives. *Int. J. SHS.* 2012. Vol. 21. P. 202—211.
48. Pogozhev Yu.S., Levashov E.A., Kudryashov A.E., Zamu-laeva E.I., Novikov A.V., Potanin A.Yu. Composite SHS materials based on titanium carbide and nikelide doped with a refractory component. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2014. Vol. 55. P. 83—91.
49. Loginov P., Mishnaevsky L., Levashov E.A., Petrzhik M. Diamond and cBN hybrid and nanomodified cutting tools with enhanced performances — development, testing and modeling. *Mater. Design.* 2015. Vol. 88. P. 310—318.
50. Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии. М.: МИСиС, 2001. Т. 1.
Libenson G.A., Lopatin V.Yu., Komarnitskii G.V. Powder metallurgy processes. Moscow: MISIS, 2001. Vol. 1 (In Russ.).
51. Шустер Л.Ш. Исследование износа режущего инструмента и формирование поверхности в связи с адгезионным взаимодействием: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. Куйбышев: Политехн. ин-т, 1975.
Shuster L.Sh. Cutting tool wear study and formation of surfaces due to adhesive interaction: Abstract of the dissertation of PhD. Kuibyshev: Politekhnikeskii institut, 1975 (In Russ.).
52. Frunk R., Schachner H., Triquet C., Kornmann, Lux B. Coating of cemented carbide cutting tools with alumina by chemical vapour deposition. *J. Electrochem. Soc.* 1976. Vol. 123. P. 285—289.