

DOI: 10.12737/24449

*Москвитин А.А., канд. техн. наук,
ООО «СКИФ-М»**Губанов А.Е., аспирант
Дуюн Т.А., д-р техн. наук, доц.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ*

anton.e.gubanov@gmail.com

Представлена методика и результаты экспериментальной оценки эксплуатационных характеристик различных типов износостойких покрытий металлорежущего инструмента для обработки труднообрабатываемых материалов. Целью исследования являлось сравнение характеристик покрытия с использованием нового адгезионного подслоя на основе соединения Нитрида гафния с характеристики ряда традиционных покрытий. Особое внимание уделялось исследованию изменения исходных характеристик покрытия под воздействием высоких температур с целью прогнозирования износостойкости покрытия при обработке труднообрабатываемых материалов. В качестве методик использовались методики оценки характеристик тонких пленок: скретч-тестирование, определение микротвердости образцов покрытий до и после отжига и анализ морфологии сферического иллица покрытия после отжига. По результатам скретч-тестирования композиция с новым адгезионным подслоем $HfZrN$ обладает лучшими параметрами адгезионной прочности как в исходном состоянии покрытия, так и после воздействия температуры $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения покрытия $HfZrN$ при обработке труднообрабатываемых материалов.

Ключевые слова: металлорежущий инструмент, износостойкие покрытия, эксплуатационные характеристики, труднообрабатываемые материалы.

Введение. Основной тенденцией развития машиностроения является повышение требований к эксплуатационным характеристикам выпускаемых изделий, переход к новым типам конструкционных материалов, таких как композиционные материалы, развитие аддитивных технологий. Повышение требований к эксплуатационным параметрам изделий приводит, как правило, к применению материалов с высокими прочностными характеристиками, относящихся к классу труднообрабатываемых материалов. Основной проблемой, возникающей при механической обработке труднообрабатываемых материалов, таких как титановые сплавы и нержавеющие стали, является высокая температура резания и интенсивный износ режущего инструмента. Поэтому улучшение рабочих характеристик и повышение периода стойкости металлорежущего инструмента для обработки труднообрабатываемых материалов является важной научной задачей [1–4].

Основным направлением улучшения характеристик режущего инструмента является нанесение на его режущую часть различных износостойких покрытий. Современная тенденция совершенствования и развития архитектуры износостойких покрытий для инструмента связана с переходом от однокомпонентных покрытий (ти-

па TiC , TiN , $TiCN$) к многокомпонентным композиционным покрытиям на основе систем двойных соединений нитридов $(Ti,Al)N$, $(Ti,Zr)N$, $(Ti,Nb)N$, $(Ti,Hf)N$ [5][6], $(Ti,Mo)N$, а также тройных соединений нитридов $(Ti,Al,V)N$, $(Ti,Zr,C)N$. Все более широкое распространение получают многофункциональные покрытия для высокоскоростного сухого резания, включающие антифрикционные слои, на основе алмазоподобного аморфного графита (DLC, $\alpha\text{-WC:H}$) [5–14], которые используют для сокращения количества используемой при обработке смазывающе-охлаждающей жидкости или полного отказа от ее применения при лезвийной высокоскоростной обработке.

Для функциональных покрытий, предназначенных для нанесения на режущий инструмент, чрезвычайно важен не только состав, структура, кристаллохимические и физико-механические свойства, архитектура покрытий, но и длительность работы покрытий на контактных площадках инструмента до момента их разрушения (долговечность) в процессе эксплуатации инструмента. Интенсивность микро (изнашивание) – и макроразрушения зависит от твердости покрытия, соответствующего соотношения между вязкостью и твердостью, прочности адгезии между слоями, покрытием и субстратом в це-

лом. Адгезионный подслоя должен обладать максимальным кристаллохимическим подобием по отношению к материалу субстрата (инструментальному материалу) и обеспечивать прочную адгезию между ними [15].

Представленная работа выполнена на ООО «СКИФ-М» в рамках реализуемого проекта по разработке перспективных конструкций металлорежущего для обработки титановых сплавов.

Методика. Авторами предлагается изменение конструкции износостойкого покрытия, представляющее собой замену традиционно используемых адгезионных слоев на соединение с

более высокими адгезионными свойствами при высоких температурах. Основной задачей исследования являлось выявление характеристик наноконпозиционного покрытия с использованием нового адгезионного подслоя на основе соединения Нитрида гафния (III) – бинарного неорганического соединения металла гафния и азота с формулой HfN и сравнение с известными традиционно используемыми покрытиями. Соединение Нитрида гафния обладает относительно высокой температурой плавления $3305\text{ }^{\circ}C$, механические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики соединения HfN

Параметр	Значение
Постоянная решетки структура B1 (Å)	4.539
Постоянная решетки структура B2 (Å)	2.86
Постоянная решетки структура B3 (Å)	4.95
Модуль объемной упругости структура B1 GPa	243.82
Модуль объемной упругости структура B2 GPa	198.50
Модуль объемной упругости структура B3 GPa	170.34
Расчетный модуль упругости C11, C12, C44 Mbar	5.48, 0.91, 1.17
Коэффициент упругости сдвига	1.94
Коэффициент упругой деформации	3.62
Модуль сдвига Mbar	1.42
Коэффициент Пуассона	0.12
Модуль упругости Mbar	4.34

Основная часть. В качестве сравниваемых исследовались образцы покрытий, представленные в табл. 2, толщина покрытий составляла 1 мкм, способ получения покрытия – вакуумно-дуговой.

Таблица 2

Исследуемые образцы

Состав покрытия	Химический состав покрытия
ZrN	Zr (Цирконий) – 96%, N(Азот) – 4%
TiN	Ti(Титан) – 92%, N(Азот) – 8%
NbN	Nb (Ниобий) – 96 %, N(Азот) – 4%
ZrHfN	Hf (Гафний) – 92%, Zr (Цирконий) – 5,5%, N(Азот) – 1,39%, O (Кислород) – 0,95%

Для определения эксплуатационных параметров износостойких покрытий с различными адгезионными подслоями в качестве методик использовались методики оценки характеристик тонких пленок:

– скретч-тестирование, определение микротвердости образцов покрытий до и после отжига;

– анализ морфологии сферического шлифа покрытия после отжига.

Скретч-тест производился на приборе Revetest фирмы CSM Instruments, Швейцария. Метод скретч-тестирования основан на контролируемом царапании алмазным индентором на выбранном участке образца/изделия. Наконечник индентора (алмазный типа «Роквелл С» с

радиусом закругления 200 мкм) перемещается по поверхности образца с постоянной, возрастающей или прогрессивной нагрузкой. При определенной критической нагрузке покрытие начнет разрушаться. Критические нагрузки очень точно регистрируются акустическим сенсором закрепленном на нагружающем плече.

Сферический шлиф производился в соответствии с ISOEN-1071-2 и VDI3198 на приборе CalotestTribotechnics. Метод получения сферического шлифа заключается в размещении на поверхности исследуемого образца шара известного диаметра. Шар приводится во вращательное движение с подачей в зону трения алмазной суспензии размером зерна 1 мкм (схема прибора изображена на рис 1).



Рис.1. Методика получения сферического шлифа: а – схема процесса; б – изображение шлифа, получаемое при помощи оптического микроскопа

В результате на поверхности образца образуется сектор сферы заданного диаметра. Данный шлиф регистрируется при помощи оптического микроскопа, далее по диаметру колец на изображении определяется толщина каждого слоя покрытия. В качестве образцов выступают заготовки, представленные на рис. 2. Плоские поверхности образца обрабатывались на установке LaboPol-30 производства компании Struers. Полирование образцов производилось в 2 этапа: предварительная шлифовка с помощью шлифовального диска MD-Allegro, 250 мм в водной среде, и окончательная с использованием полировального диска MD-Chem, 250 мм с использованием алмазной суспензии с размером частиц 1 мкм.

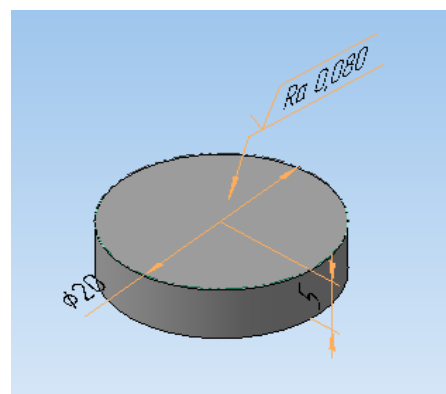


Рис. 2. Образец для нанесения покрытия
Свойства материала образца представлены в табл. 3.

таблица 3

Свойства сплава CTS18D

Свойство	Значение	Структура сплава
Производитель	Ceratizit	
Марка сплава по обозначению производителя	CTS18D	
Содержание Кобальта в % массовое	9	
Содержание смешанных карбидов %	0,75	
Средний размер зерна, мкм	0,5-0,8	
Твердость	HV10 – 1610 HV30 – 1590	
Плотность	14,55 г/см ³	

Результаты. Результаты исследований образцов по представленным методикам приведены на рис. 3-10.

Анализ представленных на рис. 3-10 графиков нагружения и акустической эмиссии позволил выявить различия в механизмах разрушения покрытий, что является следствием различных адгезионных характеристик покрытий. Образцы в исходном состоянии, представленные на рис. 3, 5, 7 и 9, показали сходный характер разрушения с равномерным увеличением глубины проникновения индентора с увеличением нагрузки. Данный характер разрушения изменяется для образцов прошедших термическую обработку. Для образцов покрытий ZrN и NbN (рис.4, 10) с

увеличением нагрузки до относительно невысоких значений в 1,8 и 7,5 Н соответственно обнаруживается разрушение покрытия с характерными всплесками на диаграммах нагружения глубины проникновения индентора и акустической эмиссии. Для образцов покрытий TiN и ZrHfN после воздействия температуры характер разрушения не изменился, не наблюдается резких всплесков на диаграммах нагружения, нет отслоения покрытия, изменились лишь численные значения максимальных нагрузок до момента разрушения. Момент разрушения покрытия определяется формой графиков нагружения, характерные точки нагружения определяются ав-

томатически по алгоритмам автоматизированной системы прибора Revetest.

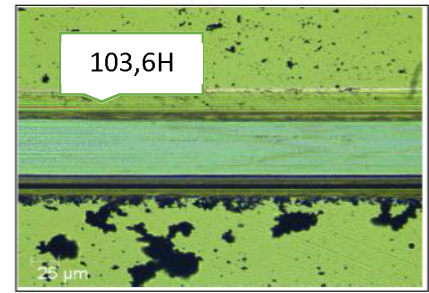
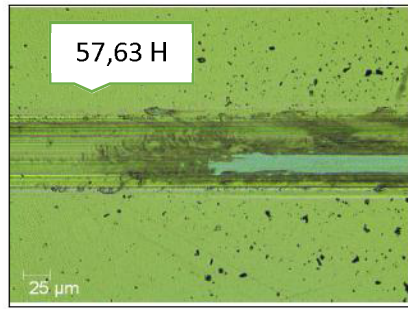
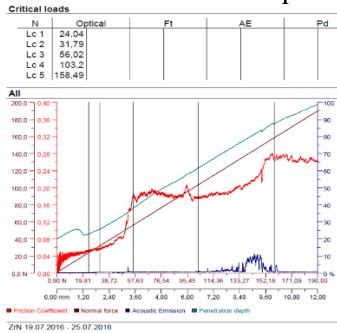


Рис. 3. Результаты исследований адгезионной прочности покрытия ZrN в исходном состоянии

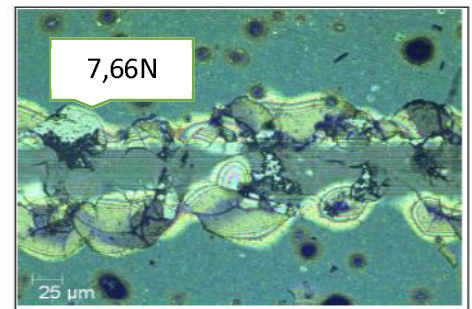
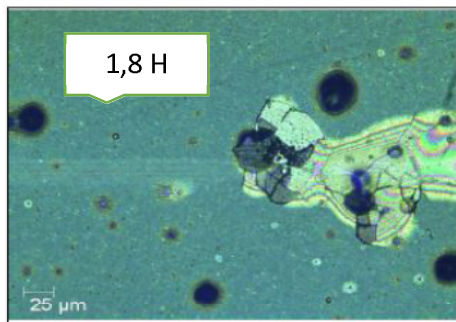
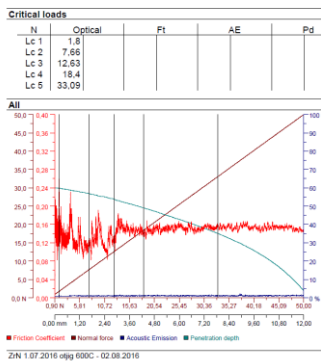


Рис. 4. Результаты исследований адгезионной прочности покрытия ZrN после отжига при температуре 600 °С

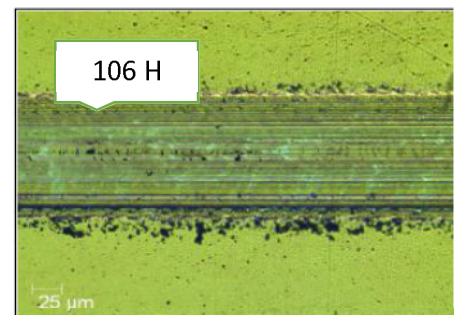
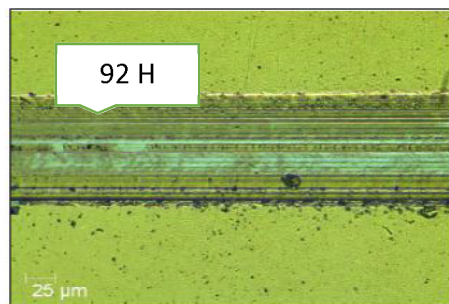
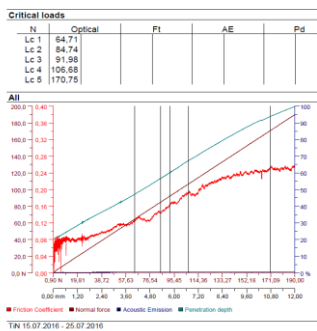


Рис. 5. Результаты исследований адгезионной прочности покрытия TiN в исходном состоянии

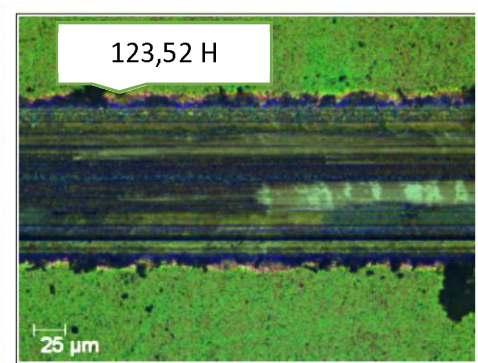
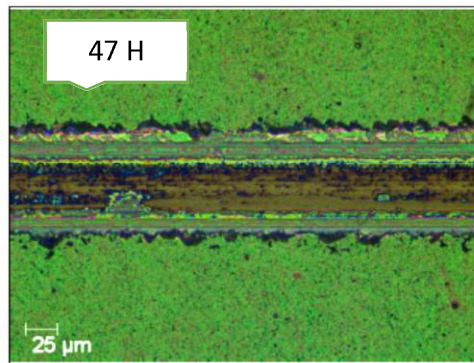
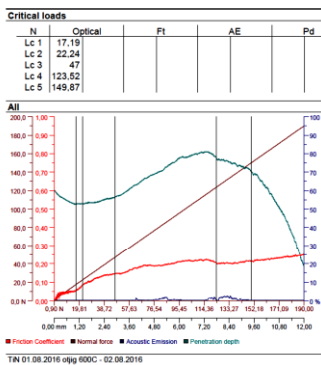


Рис. 6. Результаты исследований адгезионной прочности покрытия TiN после отжига при температуре 600 °С

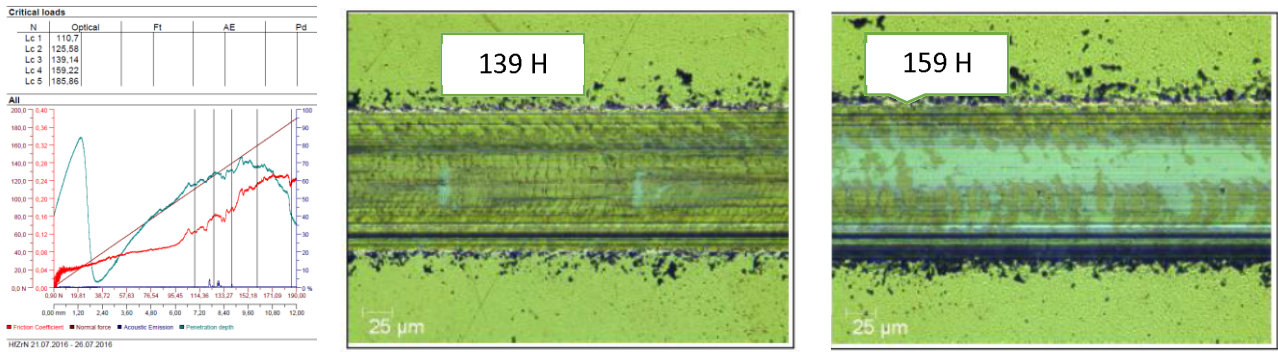


Рис. 7. Результаты исследований адгезионной прочности покрытия HfZrN в исходном состоянии

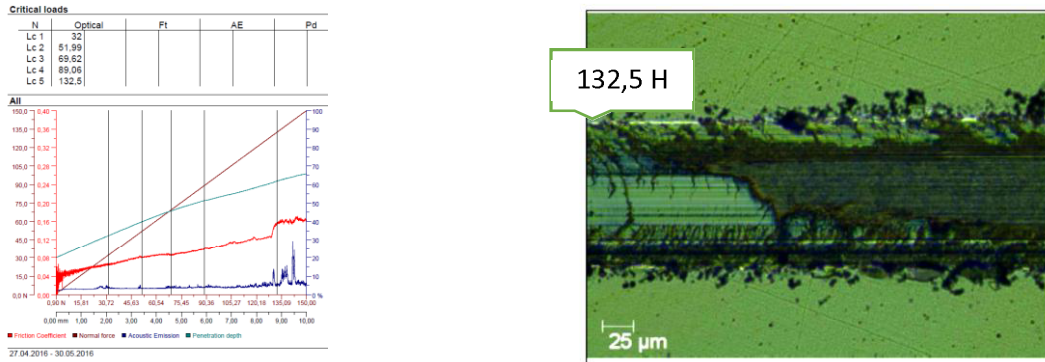


Рис. 8. Результаты исследований адгезионной прочности покрытия HfZrN после отжига при температуре 600 °C

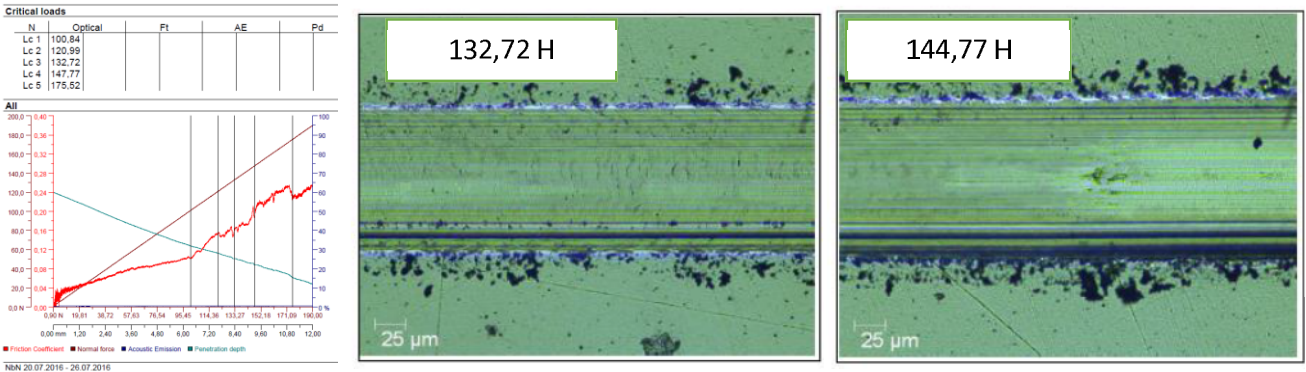


Рис. 9. Результаты исследований адгезионной прочности покрытия NbN в исходном состоянии

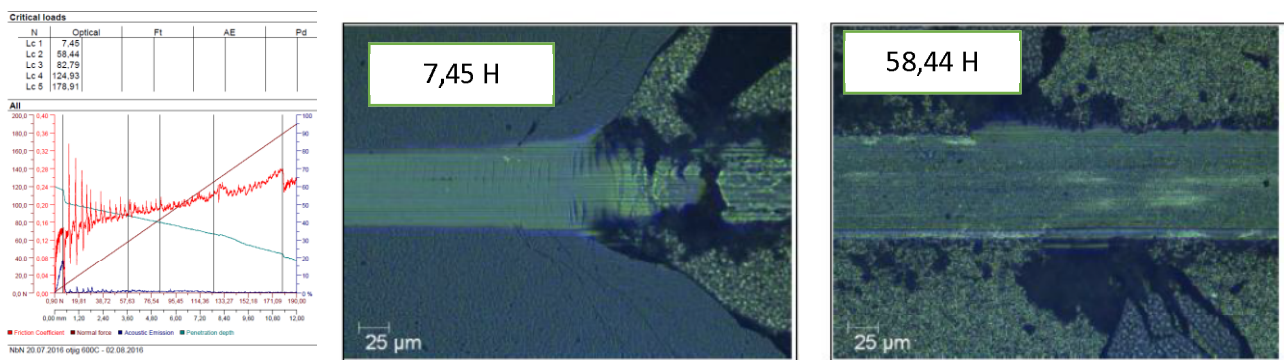


Рис. 10. Результаты исследований адгезионной прочности покрытия NbN после отжига при температуре 600 °C

После проведения теста царапина при помощи встроенного цифрового микроскопа тестируется по данным точкам для определения возможных ошибок [16]. Для всех исследуемых

образцов определены значения микротвердости в исходном состоянии и после воздействия температуры, результаты представлены на рис.11 и в табл.4.

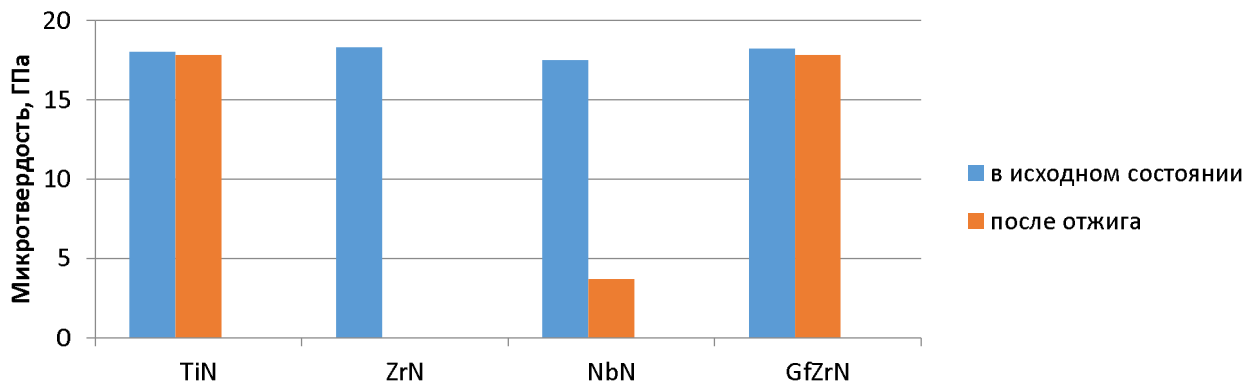


Рис. 11. Результаты измерений микротвердости покрытий до и после отжига при температуре 600 °С

Таблица 1

Результаты измерения адгезионной прочности и микротвердости покрытий до и после отжига при температуре 600 °С

Вид покрытия	Критическая нагрузка, Н		Микротвердость, HV500, ГПа	
	Исходная	После отжига при температуре 600 °С	Исходная	После отжига при температуре 600 °С
ZrN	103,4	7,66	18,3	Покрытие отслоилось
TiN	123	106	18	17,8
HfZrN	159	132	18,2	17,8
NbN	144,8	7,45	17,5	3,7

Анализируя полученные данные отметим, что композиция HfZrN обладает лучшими параметрами адгезионной прочности по результатам скретч-тестирования с изменением микротвердости на 0,4 HV500. Данный эффект проявляется, не смотря на родство соединений Hf по физико-химическим характеристикам с соединениями Zr, показавшим худшие результаты адгезионной прочности по совокупности скретч-теста и микротвердости. Также отметим, что материала)

лы обладают различными показателями адгезионной прочности в исходном состоянии и после отжига при температуре 600 °С, что позволяет говорить о том, что эксплуатационные характеристики покрытий могут расходиться с данными анализа адгезионных характеристик в исходном состоянии.

Результат анализа сферического шлифа покрытия HfZrN до и после отжига на 600 °С представлены на рис. 12.

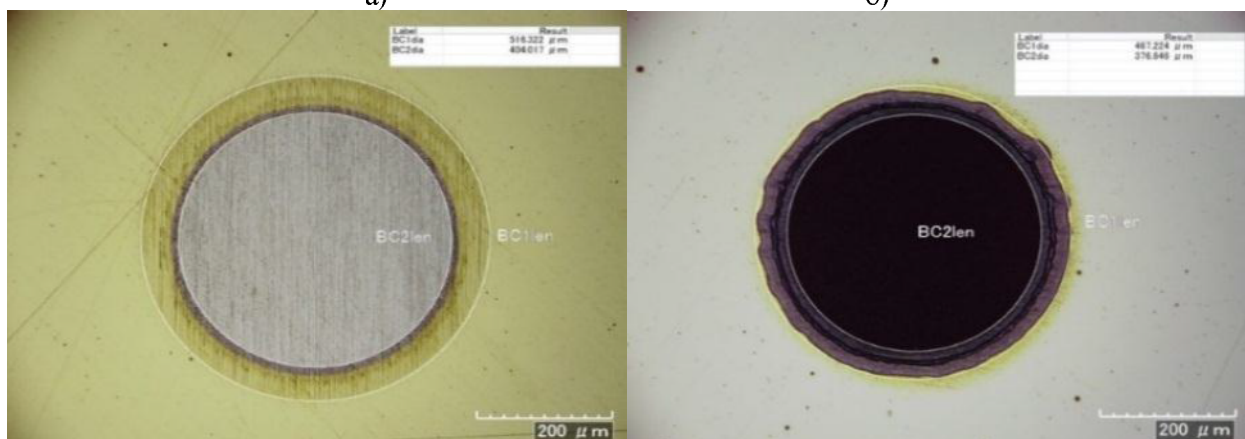


Рис. 12. Шаровой шлиф покрытия HfZrN: а – в исходном состоянии, б – после отжига при температуре 600 °С в атмосфере воздуха

Анализируя изображения шлифа покрытия до и после отжига можно сделать вывод, что морфология поверхности покрытия не измени-

лась, несколько деформировалась форма внешнего кольца шлифа, при этом не детектирова-

лось отслаивание покрытия, отсутствуют какие-либо дефекты.

Выводы. Проведенная экспериментальная оценка исследуемых покрытий позволила выявить особенности характера разрушения различных покрытий в исходном состоянии и после воздействия температуры. Предлагаемое авторами новое соединение HfZrN показало лучшие результаты по адгезионным характеристикам и термостойкости в режиме тестовых термонагрузок, имитирующих работу в реальных условиях под воздействием температуры резания при обработке труднообрабатываемых материалов. Традиционно используемое покрытие ZrN показало более низкие показатели термостойкости, по сравнению с Hf, не смотря схожие свойства двух металлов.

Полученные результаты позволяют судить о перспективности использования соединений Hf в качестве адгезионного подслоя в составе многослойного покрытия для металлорежущего инструмента для обработки труднообрабатываемых материалов.

**Работа проводилась с использованием оборудования ООО «СКИФ-М» в рамках реализуемого проекта по разработке перспективных конструкций металлорежущего для обработки титановых сплавов. Исследования адгезионных характеристик и микротвердости покрытий проводились в НИУ «БелГУ» в рамках НИР, финансируемой ООО «СКИФ-М».*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Резание труднообрабатываемых материалов. Под ред. Петрухи П.Г. М.: Машиностроение, 1972. 175 с.
2. Жучков Н.С., Беспыхатный П.Д., Чубаров А.Д., Сивориновский Л.А., Ботяшин В.Н. Повышение эффективности обработки резанием заготовок из титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1989. 152 с.
3. Пчелкин В.М., Дуюн Т.А. Эмпирические модели износостойкости твердосплавных пластин при точении коррозионно-стойкой жаропрочной стали // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №12. С. 126–131.
4. Дуюн Т.А., Гринек А.В., Сахаров Д.В. Управление тепловыми параметрами процесса механической обработки с использованием численного моделирования их тепловых зависимостей // Промышленные контроллеры АСУ. 2015. №10. С. 43–50.
5. Schmidbauer S., Hahn J., Richter F. Adhesion of metal coatings on ceramics deposited by different techniques // Surface and Coatings Technology. 1993. Vol. 59. P. 325–329.
6. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. – М.: Химия, 1977. 351 с.
7. Akira Kinbara, Shigeru Baba, Eiji Kusano. Adhesion measurement of thin films on glass substrates by scratch method // Coatings Glass. 1999. P. 218–222.
8. Volinsky A., Moody N., Gerberich W. Interfacial toughness measurements for thin films on substrates // Acta Materialia. 2002. Vol. 50, Iss 3. P. 441–466.
9. Youming Liu, Liuhe Li, Xun Cai, Qiulong Chen, Ming Xu, Yawei Hu, Tik-Lam Cheung, Shek C., Paul K. Chu. Effects of pretreatment by ion implantation and interlayer on adhesion between aluminum substrate and TiN film // Thin Solid Films. 2005. Vol. 493, Iss 1-2. P. 152–159.
10. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. Библиотека инструменталщика. М.: "Машиностроение", 1986. 192 с.
11. Нарцев В. М., Зайцев С. В., Прохоренков Д. С., Евтушенко Е. И., Ващилин В. С. Зависимость структуры ALN-покрытий от концентрации азота при осаждении на сапфир магнетронным методом // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №1. С. 144–149.
12. Пат. 8,420,237 В1 США ADHERENT COATING ON CARBIDE AND CERAMIC SUBSTRATES, Wenping Jiang, Fayetteville, AR (US); Mike Kimmel, Rogers, AR (US); Ajay P. Malshe, Springdale, AR (US); Brett McAfee, Fayetteville, AR (US).
13. Anurag Srivastava, Bhoopendra Dhar Diwan, Structural and elastic properties of ZrN and HfN: ab initio study // Canadian journal of Physics, Volume 92, 2014, 1058–1061.
14. Верещака А.А. Функциональные покрытия для режущих инструментов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. №2. С. 25–37.
15. Табаков В. П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента., М.: "Машиностроение", 1986. 314 с.
16. Маслов Е.Н. Теоретические основы процесса царапания металлов. М.: Наука, 1968. 150 с.

Moskvitin A. A., Gubanov A. E., Duyun T. A.

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF ADHESION PROPERTIES FOR WEAR-RESISTANCE TOOL COATINGS FOR MACHINING DIFFICULT-TO-CUT MATERIALS

The article describes method and results of experimental analysis for exploitation properties of different wear resistance coatings for metal-cutting tools for machining difficult-to-cut materials. The main goal of presented research is to test adhesion properties of Hafnium content metal-cutting tools coatings in comparison with conventionally used coatings. Much attention given to research of adhesion characteristics change under the thermal action to predict possible wear-resistance characteristics for coatings for metal-cutting tools for machining difficult-to-cut materials. The following techniques used for assessment of adhesion properties: scratch test, micro hardness test for samples in existing condition and after the thermal action, visual analysis for a spherical grinding microsection after the thermal action. Conclusions drawn for the perspectives of using Hafnium content coatings as wear-resistance coatings for metal-cutting tools for difficult-to-cut materials.

Key words: metal cutting tools, wear-resistance coating, exploitation properties, difficult-to-cut materials.

Москвитин Александр Александрович, генеральный директор.

ООО «СКИФ-М»

Адрес: Россия, 308017, г. Белгород, ул. Волчанская, 159.

E-mail: skif-m@mail.ru

Губанов Антон Евгеньевич, аспирант.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

E-mail: anton.e.gubanov@gmail.com

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, профессор, заве. кафедрой «Технологии машиностроения».

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

E-mail: tanduun@mail.ru