

УДК 621.9.025.7

doi 10.54708/19926502_2025_2941103

Влияние содержания ацетилена в карбонитридных покрытиях на износостойкость режущего инструмента с покрытием TiAlCN

К.Н. Рамазанов*, А.Ю. Назаров, В.Р. Мухамадеев, Т.В. Мухамадеев

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ), г. Уфа, Россия

Аннотация. В данной работе рассмотрены покрытия системы Ti-Al. Покрытия наносили на установке ННВ 6.6-И1 из двух однокомпонентных катодов. Во время нанесения покрытия в камеру подавали смесь из реакционных газов азота N₂ и ацетилена C₂H₂ в соотношении 1:4, 2:3, 3:2, 4:1. В исследованиях была определены микротвердость исследуемых образцов и сравнены значения с микротвердостью образцами без покрытия и с покрытием TiAlN. Было установлено, что наибольшую микротвердость имеет образец с покрытием при соотношении реакционных газов N₂:C₂H₂ = 2:3. На следующем этапе исследований с помощью электронной микроскопии был детально определен химический состав передней поверхности режущего инструмента. После стойкостных испытаний было определено, что наиболее износостойким покрытием при резании металлов исследуемыми образцами является покрытие при соотношении газов N₂:C₂H₂ = 4:1.

Ключевые слова: износостойкие покрытия, вакуумно-дуговое осаждение, режущий инструмент, испытания на резание, твердый сплав.

*ramazanovkn@gmail.com

Введение

Тренды в материаловедении идут по трем основным направлениям: наноструктурирование, создание композиционных материалов и высокоэнтропийное легирование. Это связано с тем, что необходимо увеличение эксплуатационных свойств деталей машиностроения, особенно востребованное в авиационно-космической области. Механообработка данных деталей затруднена из-за высоких физико-механических свойств материала, поэтому задача разработки новых материалов покрытий для металлорежущего инструмента будет оставаться актуальной.

Для улучшения эксплуатационных свойств металлорежущих инструментов разработаны и исследованы различные группы материалов покрытий [1, 2]. Широкое распространение получила система Ti-Al-N, которая обладает высокими физико-механическими свойствами и применяется при обработке твердых материалов, высокоскоростной обработке и обработке без применения СОЖ [3, 4].

TiAlN – широко применяемый материал для покрытия режущих инструментов благодаря высокой твердости и стойкости к окислению. Промышленные покрытия на режущие инструменты наносят методом физического осаждения из паровой фазы (PVD) [5–7].

При всем многообразии возможных методов осаждения покрытий, широкое практическое применение получили несколько ключевых технологий на основе химического осаждения (ХОП, CVD) и физического осаждения покрытий (ФОП, PVD). Указанные технологии позволяют обеспечить сочетание необходимых свойств: высокую твердость, хорошую адгезию, плотность и равномерность осаждения, возможность управления составом и архитектурой покрытий, но при этом имеют свои преимущества и недостатки, а также предпочтительные области применения. Поэтому в настоящее время разрабатываются комбинированные методы модификации поверхностных свойств покрытий, сочетающих преимущества рассматриваемых технологий [8–10].

Среди покрытий на основе системы Ti-Al, практически универсальным является покрытие TiAlCN. Оно обладает высокими вязкостью, твердостью, теплостойкостью и низким

коэффициентом трения, применяется при операциях механообработки. Наноструктурные композиционные покрытия TiAlCN находят широкое применение для защиты поверхностей, подвергающихся воздействию высоких температур, агрессивных сред и различных видов износа.

Методика проведения экспериментов

Покрытие наносили на установке ННВ 6.6-И1 из двух однокомпонентных катодов. Во время нанесения покрытия в камеру подавали смесь из реакционных газов азота N_2 и ацетилена C_2H_2 в соотношении 1:4, 2:3, 3:2, 4:1.

Покрытие наносили при следующих режимах: ток титанового дугового испарителя $I_{Ti} = 80$ А, ток алюминиевого испарителя $I_{Al} = 60$ А, напряжение смещения $U = 180$ В, давление в вакуумной камере $(3\dots4)\cdot10^{-3}$ Па, вращение стола 1 об/мин, время осаждения 1 час.

Принципиальная схема установки приведена на Рис. 1.

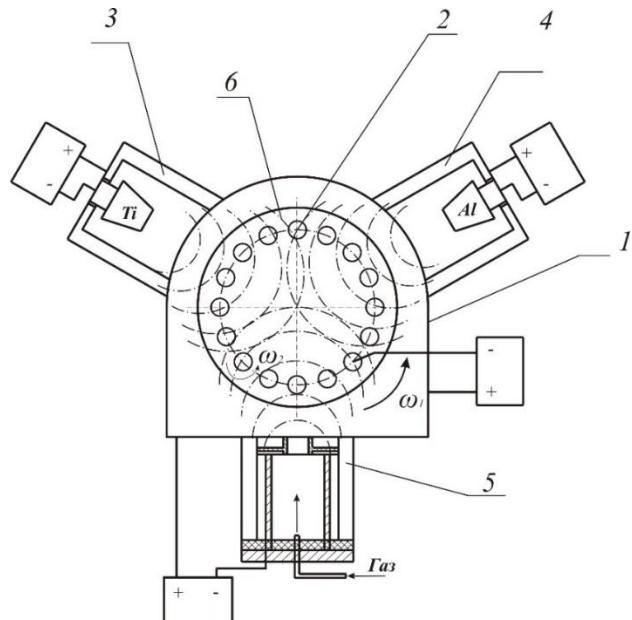


Рисунок 1. Схема устройства:

вакуумная камера 1, обрабатываемая деталь 2, электродуговой испаритель (катод) 3 из титана, электродуговой испаритель (катод) 4 из алюминия, плазменный источник с полым катодом 5, стол для установки образцов 6.

Для проведения сравнительных испытаний на твердосплавные пластины из материала BK8 было нанесено покрытие TiAlN и покрытие TiAlCN.

Химический анализ проводили на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490LV при помощи приставки для энергодисперсионного анализа. Ускоряющее напряжение регулировалось в пределах от 1 до 30–50 кВ.

Микротвердость определяли по методу Виккерса по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере EMCO-Test DuraScan 50 методом HV 0,05. На каждом образце были измерены 5 точек и вычислены средние значения (Табл. 1).

Таблица 1. Зависимость микротвердости от концентрации реакционных газов.

Материал инструмента	Микротвердость HV	Состав газа $N_2:C_2H_2$
BK8(без покрытия)	1600	
BK8+TiAlN	2200	
BK8+TiAlCN(3)	3809	4:1
BK8+TiAlCN(5)	3082	3:2
BK8+TiAlCN(7)	4870	2:3
BK8+TiAlCN(9)	2983	1:4

Для экспериментальных исследований при точении использовались заготовки из одной партии материалов, одинаковых марок. При точении использовались заготовки диаметром 70–100 мм и длиной 500 мм, предварительно обточенные и зацентрованные с обеих сторон. Заготовки зажимали в самоцентрирующемся трехкулачковом патроне и поджимали вращающимся центром, установленном в пиноли задней бабки станка.

В качестве исследуемого параметра износа инструмента использовалась средняя ширина фаски износа задней поверхности (без учета выемок). Ширину h_3 фаски износа инструмента по задней поверхности измеряли с помощью отсчетного микроскопа МИР-2П с насадкой МОВ-15 точностью отсчета до 0,002 мм. Для обеспечения достоверности результатов эксперимента согласно рекомендациям, повторялись 4–5 раз при отклонениях не более 8%.

Исследования проводились при глубине резания $t = 0,5$ мм и подаче $S = 0,11$ мм/об, при частоте вращения 1000 об/мин. Критерием затупления режущих инструментов принимали $h_3^{kp} = 0,3$ мм.

На основании экспериментальных данных были построены следующие зависимости износа по задней поверхности от пути резания (Рис. 2).

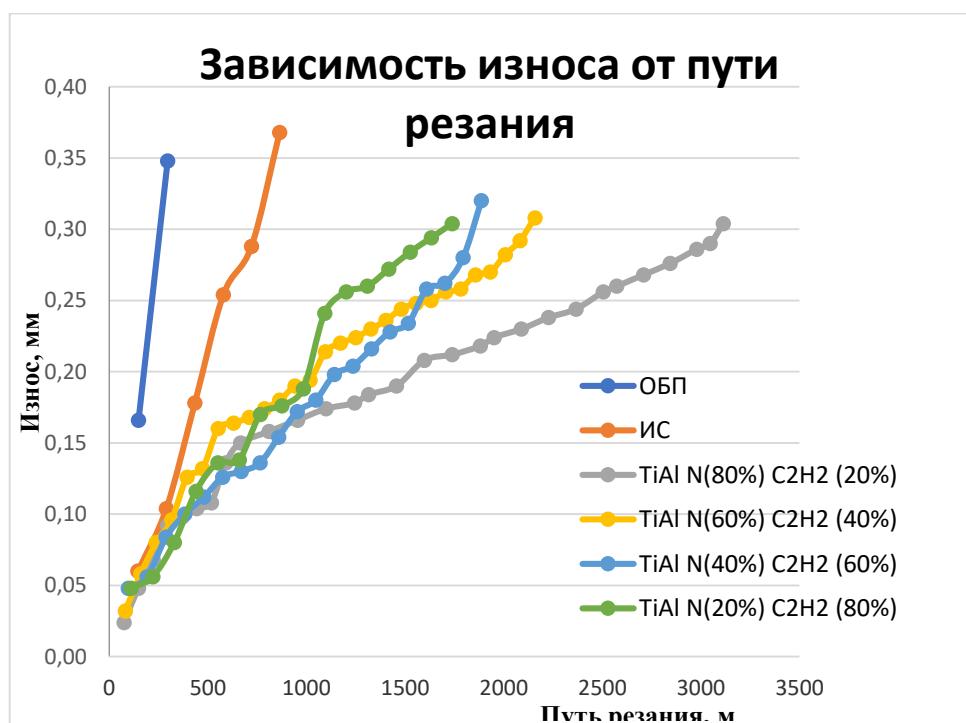


Рисунок 2. Зависимость износа от пути резания.

Растровая электронная микроскопия (РЭМ) представляет собой микрозондовый метод исследования поверхностей твердых тел. Основное преимущество этого метода состоит в том, что он позволяет наблюдать топографию поверхности с высоким разрешением и глубиной резкости, значительно превосходящими соответствующие показатели оптических микроскопов. Основные преимущества РЭМ выявляются при фрактографических исследованиях поверхностей излома для определения механизма разрушения. В работе использована установка «JEOL».

Обсуждение результатов

В Табл. 2 представлены результаты исследования химического состава образцов с поверхности до процесса резания.

Таблица 2. Химический состав образцов до резания.

Образец	C	N	O	Al	Ti	Fe	Co	W
Без покрытия						2,01	7,47	90,52
Покрытие TiAlN	21,89	9,24	0	5,73	57,03	3,92	0	1,92
Покрытие TiAlCN (3)	21,48	17,82	5,09	15,71	41,35	0	0	0
Покрытие TiAlCN (5)	22,45	16,97	0	17,49	41,24	1,64	0,21	0
Покрытие TiAlCN (7)	25,86	12,75	0	15,53	39,1	6,08	0	0,68
Покрытие TiAlCN (9)	27,26	7,81	0	13,98	47,44	1,8	0,23	1,14

На Рис. 3–8 представлены передние поверхности исследуемых инструментов после резания стали 40Х.

На Рис. 3 представлена передняя поверхность режущего инструмента без покрытия, на которой можно выделить две основные зоны (1 и 2). На первой преобладающими элементами являются вольфрам, железо, кобальт и кислород. Предположительно, в процессе резания передняя поверхность насыщается железом из обрабатываемой детали за счет диффузии. Одновременно происходит реакция с кислородом из окружающей среды благодаря высокой температуре в зоне резания. Наличие в этой зоне вольфрама и кобальта, но только в меньшем количестве по сравнению с их количеством до металлорезания. В связи с этим можно предположить, что зона 1 состоит из смеси оксидов железа, вольфрама и кобальта. Также необходимо отметить, что в зоне 1 наблюдаются включения по контрасту схожие с зоной 2. Рассматривая зону 2, обнаружено большое содержание железа, а также наличие кислорода. Железо диффундировало из обрабатываемого материала, и одновременно происходило взаимодействие кислорода с железом, что в свою очередь приводило к образованию оксидов железа. Так как железо присутствует в достаточно большом количестве, то, может быть, в этой области есть и «свободное» железо, не вступившее в реакцию ни с кислородом из окружающей среды, ни с углеродом из основы ВК8.

На Рис. 4 представлена передняя поверхность режущего инструмента с покрытием TiAlN. Условно указанную поверхность разбили на 7 зон.

В первой зоне наблюдается большое содержание углерода и железа. Как было сказано выше, железо диффундирует с поверхности обрабатываемой детали, а углерод – из основы ВК8 при разрушении карбида вольфрама WC. Возникающие контактные нагрузки и высокая температура способствуют образованию в данной зоне карбида железа. На рисунке выделено три аналогичные зоны.

В второй зоне рассматриваемого образца, согласно химическому анализу, наблюдается высокое содержание углерода (в сравнении с основой), при этом уменьшается количество вольфрама, а также обнаруживается титан. Предположительно, титан диффундировал в основу, при этом, реагируя с избытком диффундировавшего углерода, образовал карбид титана. А вольфрам остался в том же состоянии, как в основе, – в виде карбида WC.

В третьей зоне исследуемой поверхности обнаружен азот, углерод и титан, а также в небольшом количестве алюминий, кобальт и вольфрам. Наиболее вероятно, что углерод и азот находились в связи с остальными элементами в следующих возможных соединениях: TiN, AlN, TiC, WC. В данном случае еще не весь азот диффундировал в стружку и в окружающую среду в виде соединения NO₂, поэтому химический анализ показал наличие азота.

В четвертой зоне отсутствует азот, при этом появляется железо. Также наблюдается уменьшение алюминия, вольфрама и кобальта. Как и во всех рассмотренных случаях, железо диффундировало с обрабатываемой поверхности в инструмент. Также в исследуемой зоне присутствует углерод. То есть, предположительно, эта зона состоит из смеси карбидов титана и железа.

Пятая зона состоит практически только из углерода и железа, которые, реагируя между собой, дают карбид железа. Железо также диффундировало из обрабатываемой детали, а углерод – из основы инструмента. Кобальт, вольфрам и кислород, а также элементы покрытия не обнаружены.

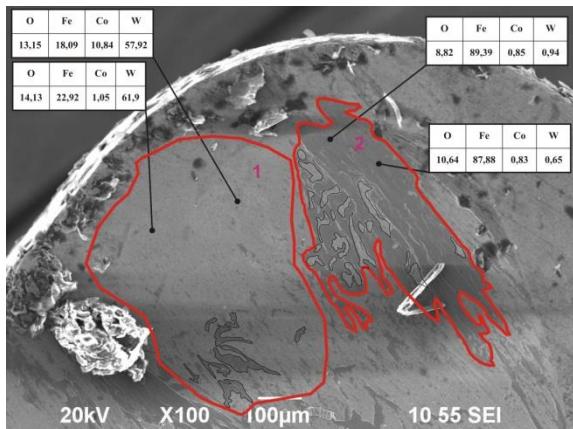


Рисунок 3. Образец BK8.

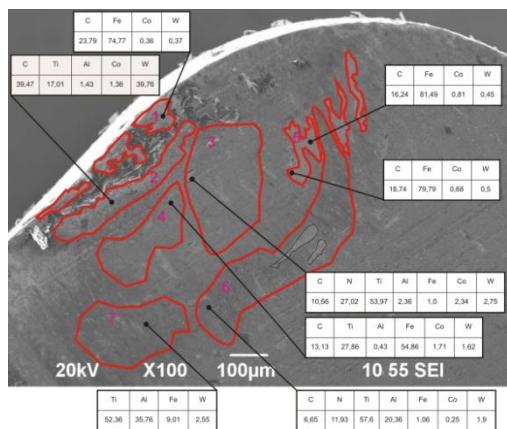
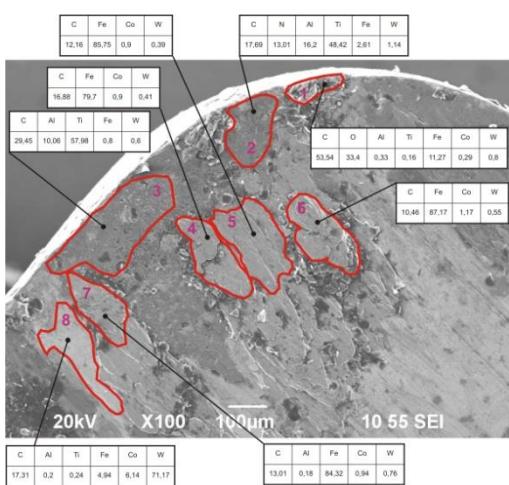
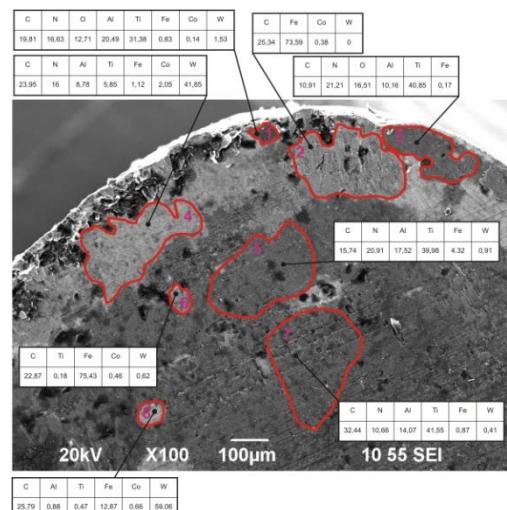
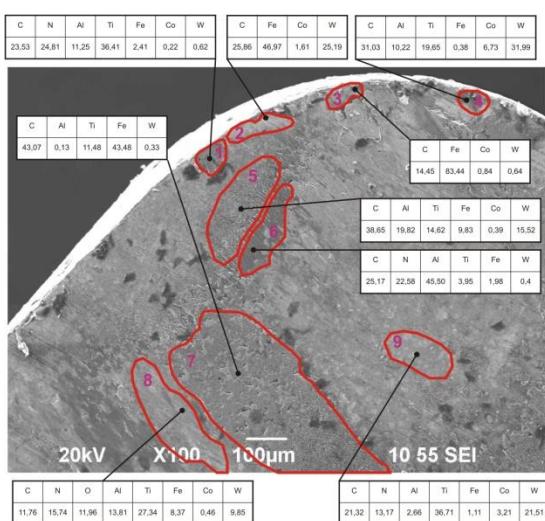
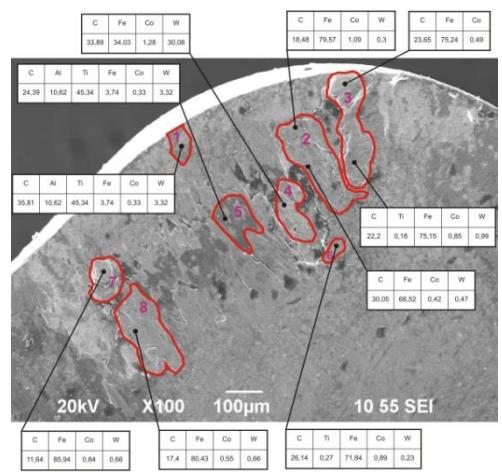


Рисунок 4. Образец с покрытием TiAlN.

Рисунок 5. Образец с покрытием (3) TiAlCN ($N_2:C_2H_2 = 4:1$).Рисунок 6. Образец с покрытием (5) TiAlCN ($N_2:C_2H_2 = 3:2$).Рисунок 7. Образец с покрытием (7) TiAlCN ($N_2:C_2H_2 = 2:3$).Рисунок 8. Образец с покрытием ,(9) TiAlCN ($N_2:C_2H_2 = 1:4$).

Выводы

Проведенные испытания показывают, что покрытие TiAlCN на основе системы TiAl, синтезированное в среде смеси реакционных газов азота и ацетилена, позволяет повысить износостойкость инструмента в 10 раз по сравнению с режущим инструментом без покрытия и в 3,5 раза по сравнению с инструментом с покрытием TiAlN, синтезированным в среде азота (по прототипу).

Исследуемое износостойкое покрытие на основе системы TiAl, синтезированное в среде смеси газов азота и ацетилена с образованием фаз TiN, AlN, TiAl, Ti₃Al, TiAl₃, TiC, TiAlC, обладает однородным составом по всему объему за счет использования плазменного источника с полым катодом.

Литература:

1. Андреев А.А., Саблев Л.П., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые покрытия. Харьков, ННЦ ХФТИ, 2010. – 318с. [Andreev A.A., Sablev L.P., Grigoriev S.N. Vacuum-Arc Coatings. Kharkiv: Kharkiv Institute of Physics and Technology, 2010. 318 p. (in Russian)].
2. Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. Харьков, ННЦ ХФТИ, 2005. 236 с. [Andreev A.A., Sablev L.P., Shulaev V.M., Grigoriev S.N. Vacuum-Arc Devices and Coatings. Kharkiv: Kharkiv Institute of Physics and Technology, 2005. 236 p. (in Russian)].
3. Андреев А.А., Григорьев С.Н. Износостойкие вакуумно-плазменные покрытия на основе титана в инструментальном производстве // Станки и инструмент. 2006. №2. С. 19–24. [Andreev A.A., Grigoriev S.N. Wear-resistant vacuum-plasma coatings based on titanium in tool production // Machines and Tools. 2006. No. 2. P. 19–24 (in Russian)].
4. Аксенов Д.С., Аксенов И.И., Лучанинов А.А., Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е. Регулировка состава Ti-Al-N покрытий, осаждаемых с применением двухканального вакуумно-дугового источника фильтрованной плазмы // ФИП. 2010. Т. 8. № 4. С. 307–313. [Aksenov D.S., Aksenov I.I., Luchaninov A.A., Reshetnyak E.N., Strelnitsky V.E. Adjustment of the composition of Ti-Al-N coatings deposited using a two-channel vacuum-arc filtered plasma source // FIP 2010. Vol.8. No.4. P. 307–313 (in Russian)].
5. Endler I., Höhn M., Herrmann M., Holzschuh H., Pitonak R., Ruppi S., Berg van den H., Westphal H., Wilde L. Aluminum-rich TiAlCN coatings by low pressure CVD // Surface & Coatings Technology. 2010. Vol. 205. P. 1307–1312.
6. Tillmann W., Grisales D., Stangier D., Thomann C.-A., Debus J., Nienhaus A., Apel D. Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 406. Art. 126664.
7. Jindal P.C., Santhanam A.T., Schleinkofer U., Shuster A.F. Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN coated cemented carbide tools in turning // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 1999. Vol. 17. P. 163–170.
8. Варданян Э.Л. Композиционные покрытия на основе интерметаллидов системы Ti-Al и технологии их нанесения из плазмы вакуумного дугового разряда. Дисс. ... к.т.н. М., 2015. [Vardanyan E.L. Composite coatings based on Ti-Al intermetallides and their deposition technologies from vacuum arc discharge plasma. Diss. ... Cand. of Tech. Sci. Moscow, 2015 (in Russian)].
9. Верещака А.А. Повышение износостойкости твердосплавных режущих инструментов путем управления параметрами функциональных слоев наноструктурированных покрытий. Дисс. ... д.т.н. Москва, 2021. [Vereshchaka A.A. Increasing the wear resistance of hard alloy cutting tools by controlling the parameters of functional layers of nanostructured coatings. Doctoral dissertation. Moscow, 2021 (in Russian)].
10. Назаров А.Ю. Разработка композиционных покрытий на основе интерметаллидов системы Ti-Al, синтезированных в среде реакционных газов. Дисс. ... к.т.н. М., 2019. [Nazarov A.Yu. Development of composite coatings based on Ti-Al intermetallides synthesized in a reactive gas environment. Diss. ... of Cand. of Tech. Sci. Moscow, 2019 (in Russian)].

Благодарности:

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Исследование физико-химических и механических процессов при формообразовании и упрочнении деталей для авиакосмической и транспортной техники» № FEUE-2023-0006.

Об авторах:

РАМАЗАНОВ Камиль Нуруллаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, ramazanovkn@gmail.com.

НАЗАРОВ Алмаз Юнирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, nazarov_almaz15@mail.ru.

МУХАМАДЕЕВ Венер Рифкатович, старший преподаватель кафедры механики и цифрового проектирования, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, veneer_muhamadeev@mail.ru.

МУХАМАДЕЕВ Тимур Венерович, студент кафедры «Технология машиностроения», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, timamv030507@gmail.com.

Metadata:

Title: Effect of the content of acetylene in carbonitride coatings on the wear resistance of a cutting tool with a *TiAlCN* coating.

Author 1: Kamil Nurullaevich Ramazanov, Dr. Sci., Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, ramazanpovkn@gmail.com.

Author 2: Almaz Yunirovich Nazarov, Cand. Sci., Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, nazarov_almaz15@mail.ru.

Author 3: Vener Rifkatovich Mukhamadeev, Senior Lecturer at the Department of Mechanics and Digital Design, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, veneer_muhamadeev@mail.ru.

Author 4: Timur Venerovich Mukhamadeev, student, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, Russia, timamv030507@gmail.com.

Abstract: In this work, the *Ti-Al* system coatings are considered. The coatings were applied using the NNV 6.6-II unit, using two single-component cathodes. During the coating process, a mixture of nitrogen N_2 and acetylene C_2H_2 reaction gases was supplied to the chamber in the following ratios: 1:4, 2:3, 3:2, and 4:1. The microhardness of the samples was determined, and the values were compared with the microhardness of the uncoated and *TiAlN*-coated samples. It was found that the sample with a coating obtained at the ratio of reaction gases $N_2:C_2H_2 = 2:3$ has the highest microhardness. In the next stage of research, the chemical composition of the front surface of the cutting tool was determined in detail using electron microscopy. After durability tests, it was determined that the most wear-resistant coating when cutting metals with the studied samples is the coating obtained at the ratio of gases $N_2:C_2H_2 = 4:1$.

Keywords: wear-resistant coatings, vacuum-arc deposition, cutting tool, cutting tests, hard alloy.