

Исследование влияния соотношения реакционных газов при осаждении покрытия системы Ti–Al–C–N на износостойкость режущего инструмента

© 2022

Рамазанов Камиль Нуруллаевич¹, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры технологии машиностроения

Вардадян Эдуард Леонидович², доктор технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии машиностроения

Мухамадеев Венер Рифкатович^{*3}, старший преподаватель кафедры механики и цифрового проектирования

Назаров Алмаз Юнирович⁴, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии машиностроения

Мухамадеев Ильшат Рифкатович⁵, старший преподаватель кафедры сварочных,
литейных и аддитивных технологий

Николаев Алексей Александрович⁶, ассистент кафедры технологии машиностроения
Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа (Россия)

*E-mail: vener_muhamadeev@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7962-5964>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7047-6459>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2018-4877>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4711-4721>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5998-4994>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2584-4790>

Поступила в редакцию 06.05.2022

Принята к публикации 01.08.2022

Аннотация: Приведены результаты исследования компонентного состава смеси реакционных газов при синтезе карбонитридных покрытий системы Ti–Al–C–N, оказывающих влияние на износостойкость режущего инструмента. Покрытие было нанесено на модернизированной установке ННВ-6.6-И1 распылением из двух однокомпонентных катодов с асистирующим плазменным источником с накальным катодом. 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. Представлены результаты измерений микротвердости исследуемых образцов, по результатам которых установлено, что наибольшее значение микротвердости (4870 HV0.05) имеет образец с покрытием, осажденным при соотношении реакционных газов N₂:C₂H₂=2:3. Приведены результаты натурных испытаний твердосплавных резцов с исследуемыми покрытиями. По итогам стойкостных испытаний было определено, что резец с покрытием, нанесенным при соотношении газов N₂:C₂H₂=4:1, увеличивает стойкость инструмента в 10 раз по сравнению с режущим инструментом без покрытия. Методом электронной микроскопии был исследован химический состав передней поверхности режущего инструмента после испытаний. Анализ химического состава поверхности после резания показал, что на образце с покрытием, полученным при соотношении реакционных газов азота и ацетилена 4:1, содержание элементов покрытия на поверхности гораздо выше, чем у других исследуемых покрытий, что свидетельствует о меньшем износе покрытия. Однако на некоторых участках передней поверхности присутствует железо, что свидетельствует о налипании обрабатываемого материала на инструмент.

Ключевые слова: титан; алюминий; покрытие; режущий инструмент; карбонитриды; износостойкость; микротвердость.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ МК-4991.2022.4.

Для цитирования: Рамазанов К.Н., Вардадян Э.Л., Мухамадеев В.Р., Назаров А.Ю., Мухамадеев И.Р., Николаев А.А. Исследование влияния соотношения реакционных газов при осаждении покрытия системы Ti–Al–C–N на износостойкость режущего инструмента // *Frontier Materials & Technologies*. 2022. № 3. С. 32–43. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-2-32-43.

ВВЕДЕНИЕ

Механообработка новых перспективных конструкционных материалов затруднена из-за высоких физико-механических свойств обрабатываемых материалов. В связи с этим потребность разработки новых материалов и покрытий для металлорежущего инструмента остается крайне актуальной задачей. TiAlN – наиболее распространенное покрытие для повышения стойкости металлорежущих инструментов. В работе [1] рассматривали высокоскоростное чистовое точение титанового сплава твердосплавными инструментами с покрытиями

TiAlN. Авторами установлено, что при обработке титанового сплава присутствуют адгезионный, окислительный и диффузионный виды износа. Однако исследования, направленные на поиски и разработку новых способов усовершенствования эксплуатационных свойств режущего инструмента, не прекращаются. В работе [2] исследовали фрезы с покрытиями TiAlN и TiAlSiN при обработке закаленной инструментальной стали. Авторами установлено, что в рассматриваемых случаях основными механизмами износа являются адгезионный и истирание с последующим отслоением. При этом минимальный износ наблюдался на инструментах

с покрытием TiAlSiN. Одним из перспективных направлений считается увеличение твердости покрытий при увеличении модуля упругости, то есть достижение величины индекса пластичности (отношения твердости к модулю упругости H/E) $\rightarrow 0,2...0,3$. Также важным критерием для износостойких покрытий является низкий коэффициент трения. В работе [3] приводится исследование влияния шероховатости поверхности покрытия TiAlN на коэффициент трения. Авторами установлено, что при низкой шероховатости, средней твердости и среднем остаточном напряжении обеспечивается повышенная износостойкость инструмента с покрытием TiAlN. В работе [4] представлены и проанализированы последние разработки на основе TiAlN, а также проведено сравнение механических свойств и характеристик резания при металлообработке. Как известно, карбидосодержащие и алмазоподобные покрытия имеют высокую твердость и низкий коэффициент трения, однако их недостатком является высокая хрупкость. Нитридные соединения имеют высокую твердость и пластичность, но коэффициент трения у них выше, чем у большинства карбидосодержащих покрытий [5; 6]. Несмотря на широкое применение покрытия TiAlN, покрытие TiCN также применяется на различных инструментах. Оно обладает высоким уровнем вязкости, твердости, теплостойкости и низким коэффициентом трения. Однако в настоящее время практически отсутствует информация о влиянии концентрации углерода и азота на физико-механические свойства покрытия TiAlCN [7–9].

В работе [8] рассматривалось влияние процентного содержания углерода на структуру, фрикционные, коррозионные и трибокоррозионные свойства. Покрытия наносились на подложку из кремния и на нержавеющую сталь и исследовались в лабораторных условиях. Однако влияние концентрации углерода на эксплуатационные свойства режущих инструментов авторами не рассматривалось. В связи с этим исследование влияния процентного содержания углерода в смеси реакционных газов на стойкость режущих инструментов является крайне актуальной задачей и требует дальнейшего изучения.

При всем многообразии возможных методов осаждения покрытий широкое практическое применение получили несколько ключевых технологий на основе химического и физического осаждения покрытий [10–12]. В настоящее время разрабатываются комбинированные методы модификации поверхностных свойств покрытий, сочетающих преимущества рассматриваемых технологий [13–15].

В большинстве публикаций приводятся результаты исследований влияния содержания углерода на физико-механические свойства и структурно-фазовый состав покрытия TiAlCN, причем исследования выполнены в лабораторных условиях, а производственные испытания режущих инструментов с синтезируемыми покрытиями не рассматриваются. Ведутся работы по исследованию состава и твердости покрытий на режущих инструментах с целью определения износостойкости [16–18]. Как известно, в процессе эксплуатации на инструмент воздействует большое количество различных факторов [19; 20], что зачастую невозможно смоделировать в лабораторных условиях. Исходя из вышесказан-

ного, в данной работе основное внимание было уделено проведению исследований влияния покрытий на стойкость металлорежущего инструмента.

Цель исследования – повышение ресурса металлорежущего инструмента путем подбора оптимального соотношения смеси реакционных газов N_2 и C_2H_2 при вакуумном ионно-плазменном осаждении покрытий системы Ti–Al–C–N.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Покрытие наносили на модернизированной установке ННВ-6.6-И1 распылением из двух однокомпонентных катодов при ассистировании процесса плазменным источником с полым катодом (ПИПК). 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 через плазмогенератор ПИПК, который подает в камеру ионизированный газ.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

Покрытие наносили при следующих режимах: ток титанового дугового испарителя $I_{Ti}=120$ А, ток алюминиевого испарителя $I_{Al}=100$ А, напряжение смещения $U=280$ В, давление в вакуумной камере $(3...4) \cdot 10^{-3}$ Па, время осаждения – 1 ч.

Для проведения сравнительных испытаний на твердосплавные пластины из сплава ВК8 (зарубежный аналог – сплав В35) были нанесены однослойные покрытия TiAlN и TiAlCN.

Химический анализ проводили на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490LV при помощи приставки для энергодисперсионного анализа. Ускоряющее напряжение при съемке было 20 кВ. Давление в камере составляло 10^{-7} Па.

EDX-анализ элементов C, N, O использовался для качественной оценки химического состава поверхности инструмента до и после испытаний с целью фактического обнаружения данных элементов.

Микротвердость определяли по методу Виккерса по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере EMCO–TestDuraScan 50 при нагрузке 0,05 кг, на каждом образце микротвердость была измерена в 5 точках.

Толщина покрытия определялась с помощью прибора CSM Calotest по результатам измерения параметров 3 лунок.

Для экспериментальных исследований при точении использовались заготовки из одной партии материалов одинаковых марок диаметром 70–100 мм и длиной 500 мм, предварительно обточенные и зацентрованные с обеих сторон. Заготовки зажимали в самоцентрирующемся трехулачковом патроне и поджимали вращающимся центром, установленным в пиноли задней бабки станка. Исследования проводились при глубине резания $t=0,5$ мм и подаче $S=0,11$ мм/об при частоте вращения 1000 об/мин. 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 с точностью отсчета до 0,002 мм. Критерий затупления режущих инструментов принимали равным $h_3=0,3$ мм. Для обеспечения

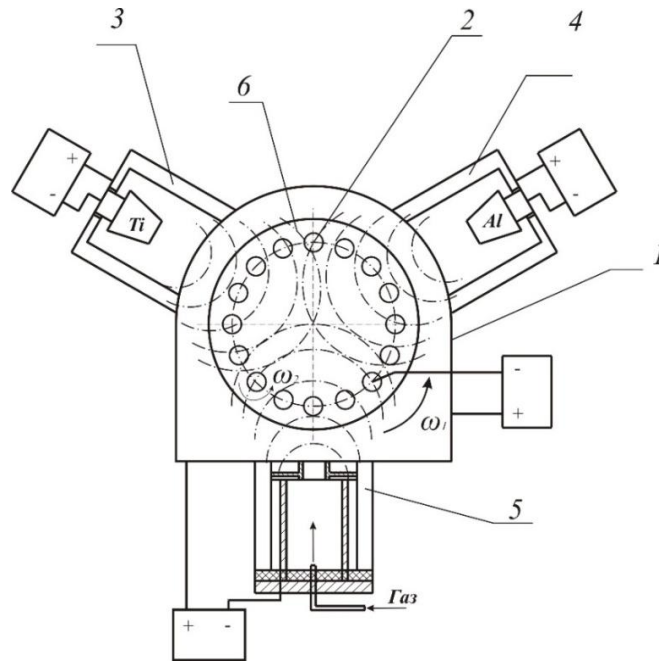


Рис. 1. Схема установки ННВ-6.6-III.

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

Fig. 1. NNV-6.6-III unit diagram.

1 – vacuum chamber, 2 – treated part, 3 – titanium electric arc evaporater (cathode), 4 – aluminum electric arc evaporater (cathode), 5 – hollow cathode plasma source, 6 – table for sample installation

достоверности результатов эксперимента согласно рекомендациям исследования повторялись 4–5 раз при отклонениях не более 8 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сравнения состава покрытий был выполнен химический анализ исходных покрытий (таблица 1).

На основании экспериментальных данных при проведении натурных испытаний были построены зависи-

мости износа задней поверхности от пути резания для резцов в исходном состоянии и с различными покрытиями (рис. 2).

Результаты измерений показали, что толщины покрытий изменялись в пределах от 2,5 до 2,7 мкм (рис. 3).

На рис. 4–6 представлены передние поверхности исследуемых инструментов после резания стали 40Х с массовыми элементными составами выделенных зон.

На рис. 4 а представлена передняя поверхность режущего инструмента без покрытия, на которой можно

Таблица 1. Химический состав образцов до резания
Table 1. Chemical composition of specimens before cutting

Образец	C	N	Al	Ti	Co	W
ВК8 (без покрытия)	–	–	–	–	8,07	91,53
ВК8+TiAlN	21,89	9,24	5,73	60,95	0	1,92
ВК8+TiAlCN(1)	21,48	22,91	15,71	41,35	0	0
ВК8+TiAlCN(2)	22,45	16,97	17,49	42,88	0	0
ВК8+TiAlCN(3)	25,86	12,75	15,53	45,18	0	0,68
ВК8+TiAlCN(4)	27,26	7,81	13,98	49,24	0	1,14

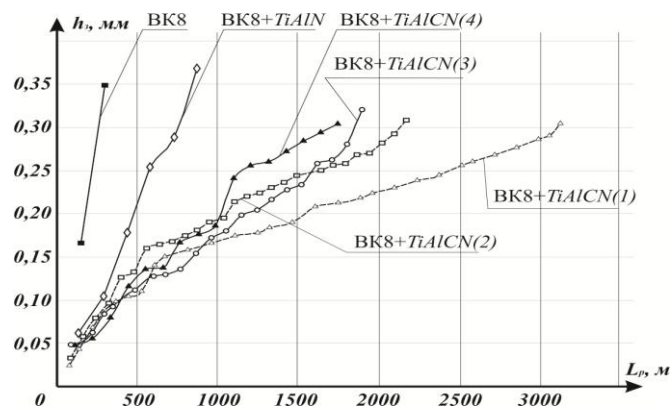


Рис. 2. Зависимость износа по задней поверхности от пути резания
 Fig. 2. The dependence of wear over the clearance face on a cutting way

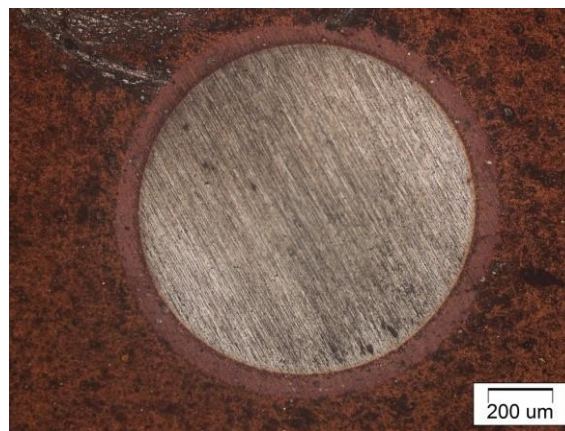


Рис. 3. Изображение лунок с покрытиями на основе системы Ti-Al-C-N
 Fig. 3. A view of dimples with Ti-Al-C-N-based coatings

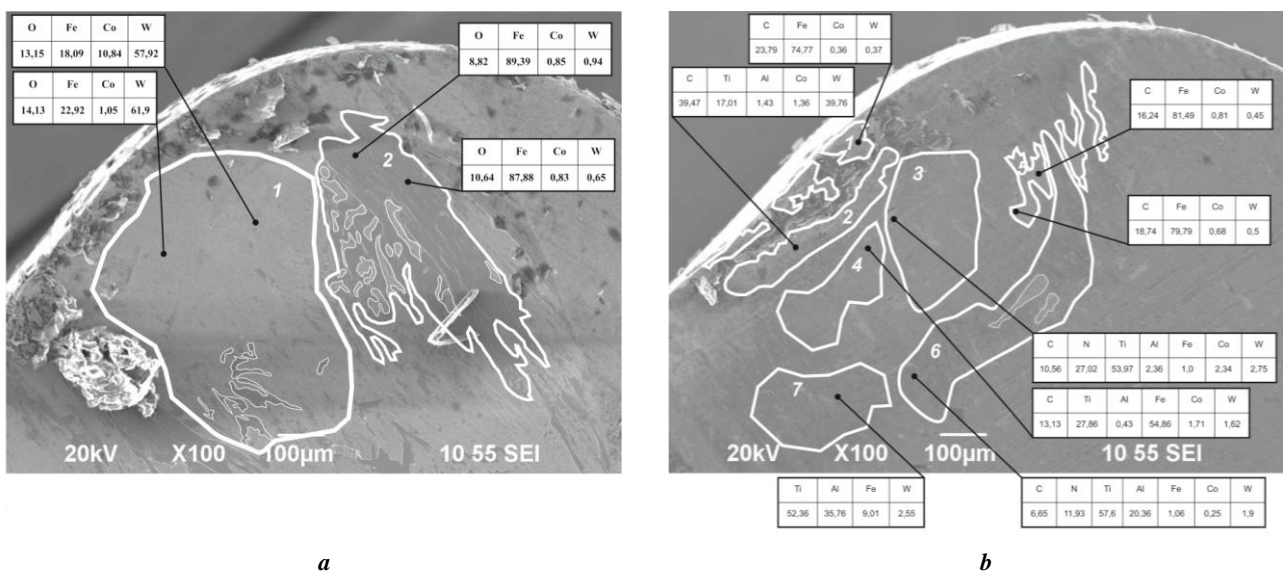


Рис. 4. Образцы BK8: а – без покрытия; б – с покрытием TiAlN
 Fig. 4. B35 samples: a – without coating; b – with TiAlN coating

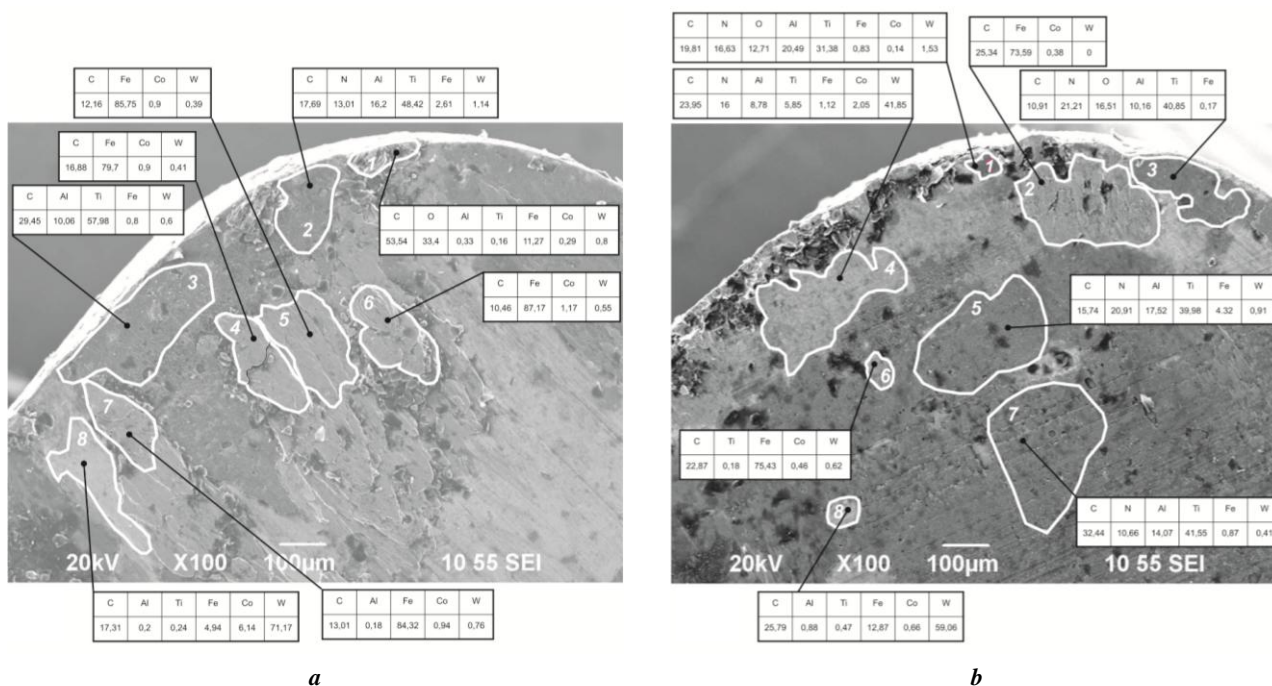


Рис. 5. Образцы ВК8: а – с покрытием TiAlCN ($N_2:C_2H_2=4:1$); б – с покрытием TiAlCN ($N_2:C_2H_2=3:2$)
 Fig. 5. B35 samples: a – with TiAlCN ($N_2:C_2H_2=4:1$) coating; b – with TiAlCN ($N_2:C_2H_2=3:2$) coating

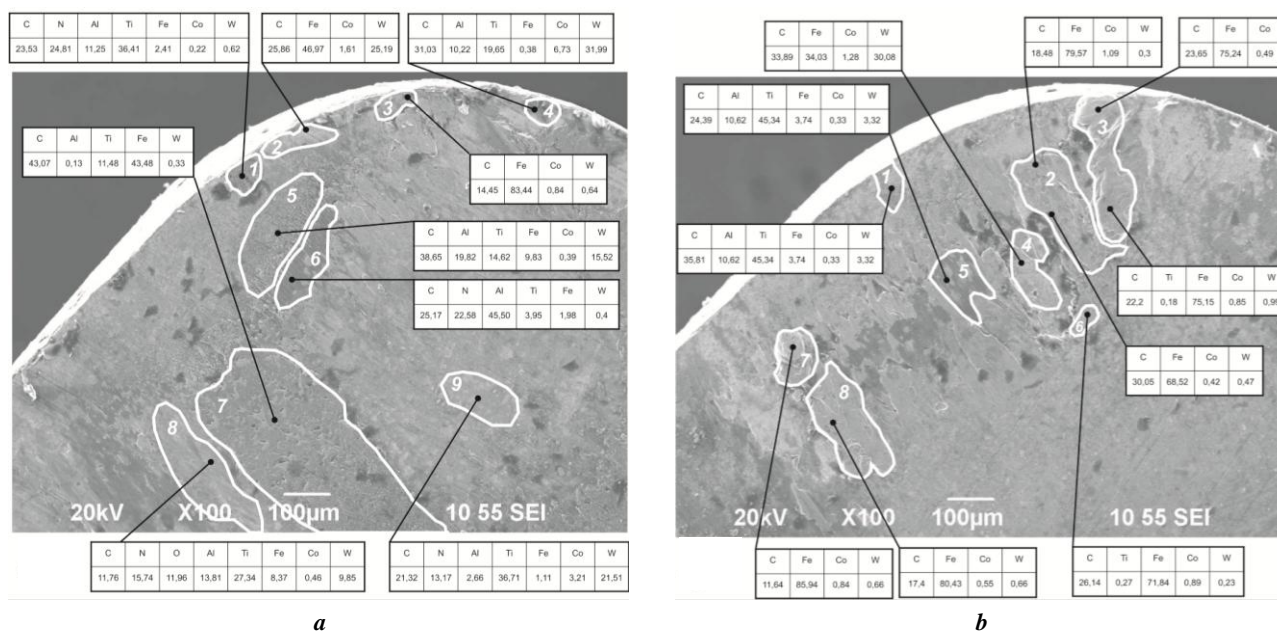


Рис. 6. Образцы ВК8: а – с покрытием TiAlCN ($N_2:C_2H_2=2:3$); б – с покрытием TiAlCN ($N_2:C_2H_2=1:4$)
 Fig. 6. B35 samples: a – with TiAlCN ($N_2:C_2H_2=2:3$) coating; b – with TiAlCN ($N_2:C_2H_2=1:4$) coating

выделить две основные зоны (1 и 2). В первой преобладающими элементами являются вольфрам, железо и кобальт. За счет больших сил резания и высоких температур, возникающих в процессе, на переднюю поверхность инструмента налипает железо, отделенное от обрабатываемой детали за счет диффузии. Также необходимо отметить, что в зоне 1 наблюдаются включения, по контрасту схожие с зоной 2. Исследования второй зоны показали наличие большого количества железа.

Переднюю поверхность режущего инструмента, представленную на рис. 4 б, разбили на семь зон в зависимости от химического состава и рельефа для анализа процессов, происходящих во время резания. В зонах 1 и 5 наблюдается большое содержание железа. Аналогичные зоны наблюдаются и на рис. 5 а – зоны 1, 4, 5, 6, 7; рис. 5 б – 2, 6; рис. 6 а – 3; рис. 6 б – 2, 3, 6, 7, 8. Возникающие контактные нагрузки и высокая температура способствуют образованию соединений из составляющих

элементов покрытия, инструмента и обрабатываемой детали. В зоне 2 обнаружено небольшое количество вольфрама и титана. В зонах 3 и 4 исследуемой поверхности обнаружен титан, в небольшом количестве алюминий (в сравнении с исходным составом), а также кобальт и вольфрам. Как и во всех рассмотренных случаях, железо налипает с обрабатываемой заготовки на инструмент. В зоне 6 наблюдается незначительное изменение количества титана и алюминия. Зона 7 практически вся состоит из алюминия и титана.

На рис. 5 а представлена передняя поверхность режущего инструмента с покрытием TiAlCN(1), которую условно разбили на восемь зон. В зоне 1 наблюдается большое количество железа. Элементы покрытия не обнаружены, что подтверждает факт полного износа покрытия в указанной зоне. В зоне 2 происходит уменьшение доли титана, при этом увеличилось количество алюминия. Покрытие осталось на поверхности инструмента, но изменилось количество составляющих элементов. В зоне 3 происходит уменьшение количества алюминия и увеличение титана, азот не обнаружен. В зоне 8 уменьшается содержание железа и обнаруживается кобальт и вольфрам. То есть в данной зоне отсутствует покрытие.

На рис. 5 б представлена передняя поверхность режущего инструмента с покрытием TiAlCN(2). Условно указанную поверхность разбили на восемь зон. В зонах 1 и 3 обнаружены все элементы покрытия. В зоне 4 содержание алюминия уменьшилось в 2 раза, а титана – в 7 раз. Обнаруживается небольшое содержание железа, а также появляются кобальт и вольфрам, но в меньшем содержании по сравнению с основой. В зоне 5, кроме элементов покрытий, наблюдается небольшое количество железа. Зона 7 в основном состоит из элементов покрытия.

На рис. 6 а представлена передняя поверхность режущего инструмента с покрытием TiAlCN(3). Условно указанную поверхность разбили на девять зон. В зоне 1, кроме элементов покрытия, присутствует железо, что приводит к уменьшению количества остальных элементов. В зоне 2 присутствуют железо и вольфрам. В зонах 4 и 5 обнаружены титан, алюминий и вольфрам. В зоне 6 присутствуют все элементы покрытия, но происходит значительное уменьшение титана и увеличение доли алюминия более чем в 2 раза. В зоне 7 обнаружены титан и железо. В зоне 8, кроме элементов покрытия, присутствует железо. В зоне 9 обнаружены все элементы покрытия, однако алюминий содержится в небольшом количестве.

На рис. 6 б представлена передняя поверхность режущего инструмента с покрытием TiAlCN(4). Условно указанную поверхность разбили на восемь зон. В зоне 1 обнаружены практически все элементы покрытия. В зоне 4 присутствуют железо, вольфрам и небольшое количество кобальта. В зоне 5, кроме азота, присутствуют остальные элементы покрытия и небольшое количество железа и вольфрама.

На рис. 7 и 8 представлены EDX-спектры и карты распределения элементов образцов BK8+TiAlCN(1) и BK8+TiAlCN(4).

На карте распределения элементов образца BK8+TiAlCN(1) (рис. 7) в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали видно, что большую часть из

этих элементов составляет железо. При этом ближе к грани режущей кромки наблюдается наличие титана и алюминия. То есть покрытие в этой зоне не износилось до основы. На рис. 8 наблюдается практически полный износ покрытия. Контактная область в основном состоит из вольфрама, кобальта и железа.

На рис. 9 показана зависимость микротвердости от состава реакционного газа. Повышение твердости покрытия с увеличением содержания углерода обусловлено следующими факторами: уменьшение размера зерна приводит к эффекту Холла – Петча, который способствует повышению твердости пленки; атомы С частично замещают атомы N с образованием твердого раствора. Это приводит к искажению решетки, что блокирует движение дислокаций, а также увеличивает твердость покрытия [8].

Максимальное значение твердости покрытия достигает 4870 HV_{0,05}, дальнейшее увеличение содержания углерода приводит к постепенному снижению твердости до 2983 HV_{0,05}. Существенное снижение твердости после достижения максимального значения при увеличении содержания углерода можно объяснить увеличением содержания аморфного углерода [8].

Согласно графику зависимости пути резания от состава реакционного газа (рис. 10) оптимальным составом для достижения максимальной износостойкости является соотношение азота к ацетилену 4:1.

Таким образом, детальный анализ химического состава на поверхности резцов из твердого сплава с разными упрочняющими покрытиями показал, что изменение содержания составляющих в смеси реакционных газов влияет не только на физико-механические, но и на эксплуатационные свойства. Изменение содержания состава реакционного газа приводит к изменению как износостойкости, так и механизма износа. Полученные результаты необходимо более детально исследовать с применением рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопией, но уже на данном этапе они могут быть рекомендованы к применению по отношению к различным металлорежущим инструментам.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ химического состава передней поверхности режущего инструмента показал, что на поверхности инструмента с покрытием, синтезированным при соотношении смеси азота к ацетилену 4:1, наблюдаются элементы покрытия в большем количестве, чем на инструментах с другими покрытиями. При этом на всех инструментах наблюдается налипание обрабатываемого материала. Карты распределения элементов показывают, что на поверхности инструмента с покрытием, синтезированным при соотношении смеси азота к ацетилену 4:1, элементы покрытия присутствуют на контактном крае поверхности, а налипание наблюдается на расстоянии от края инструмента. На поверхности инструмента с покрытием, синтезированным в соотношении азота к ацетилену 1:4, изнашивание покрытия и налипание наблюдается у режущей кромки.

Увеличение концентрации ацетилена приводит к увеличению содержания углерода в составе синтезируемого покрытия. Изменение соотношения концентрации

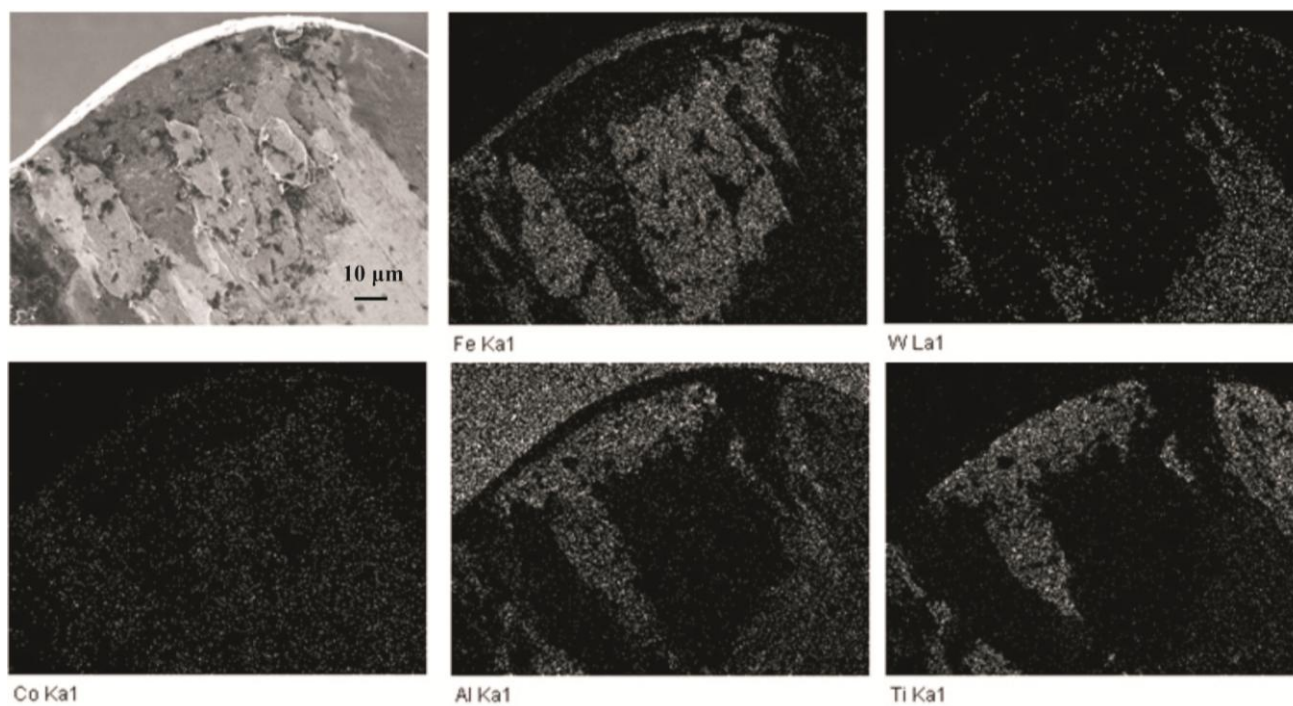
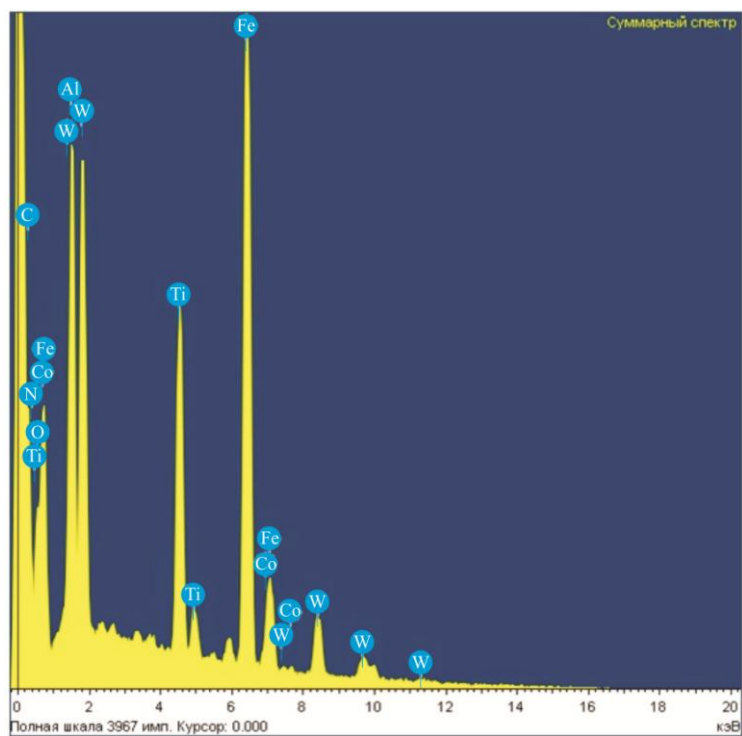


Рис. 7. EDX-спектр и карта распределения элементов $BK8+TiAlCN(1)$
Fig. 7. EDX-spectrum and distribution maps of $B35+TiAlCN(1)$ elements

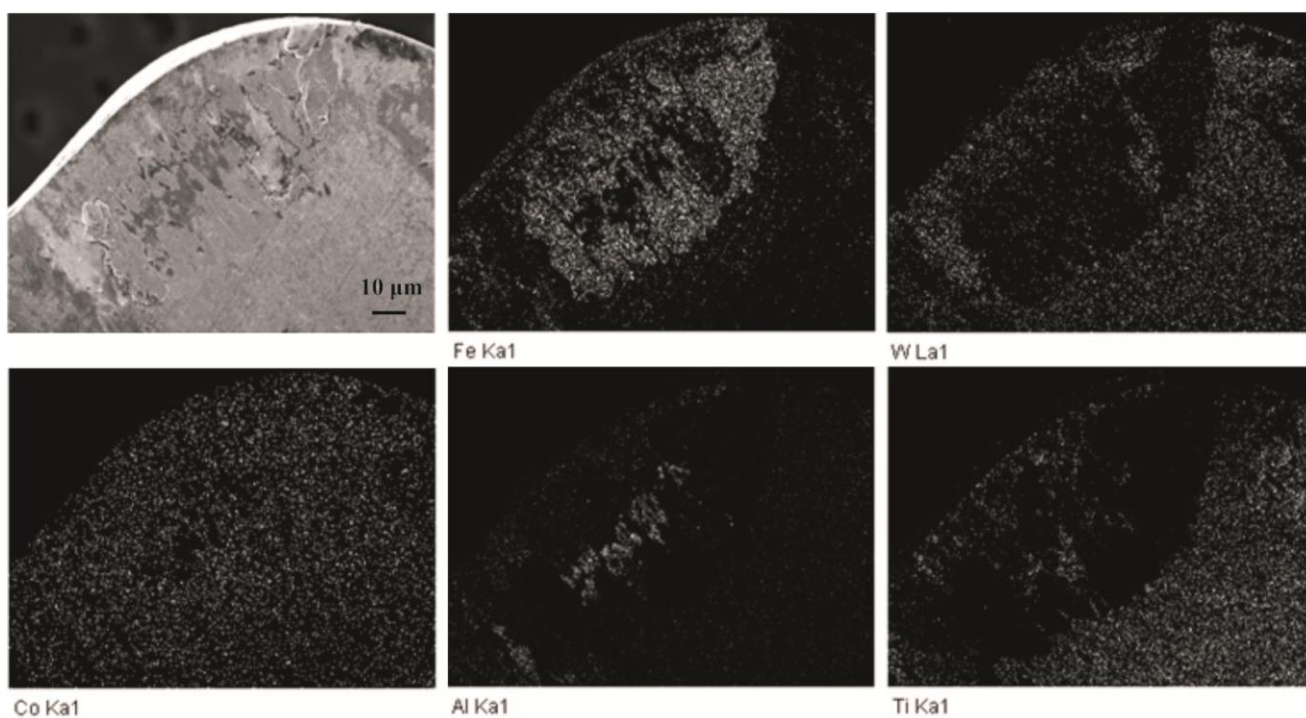
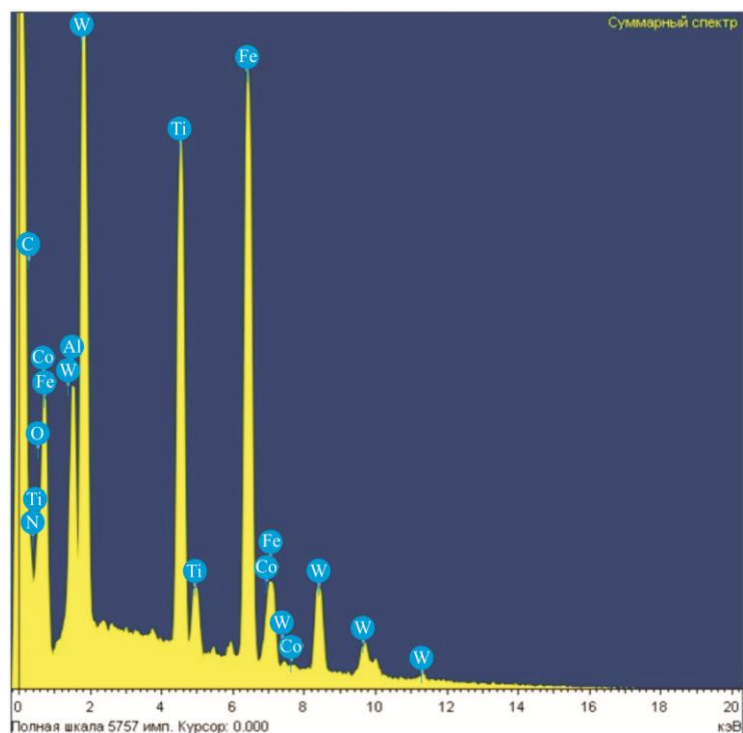


Рис. 8 EDX-спектр и карта распределения элементов $BK8+TiAlCN(4)$
Fig. 8. EDX-spectrum and distribution maps of $B35+TiAlCN(4)$ elements

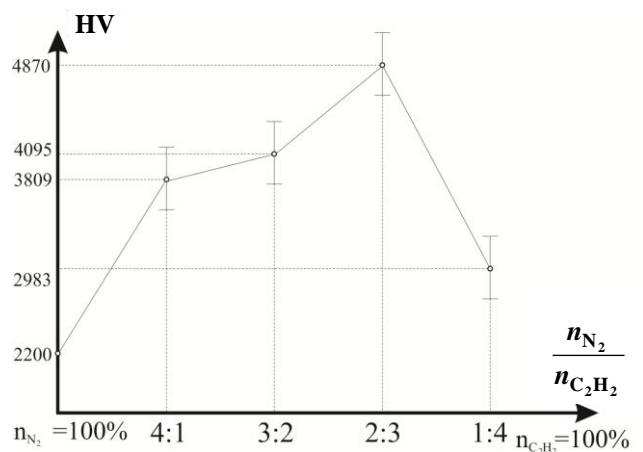


Рис. 9. График зависимости микротвердости от состава соотношения реакционных газов
 Fig. 9. The graph of the microhardness dependence on the composition of the reaction gases ratio

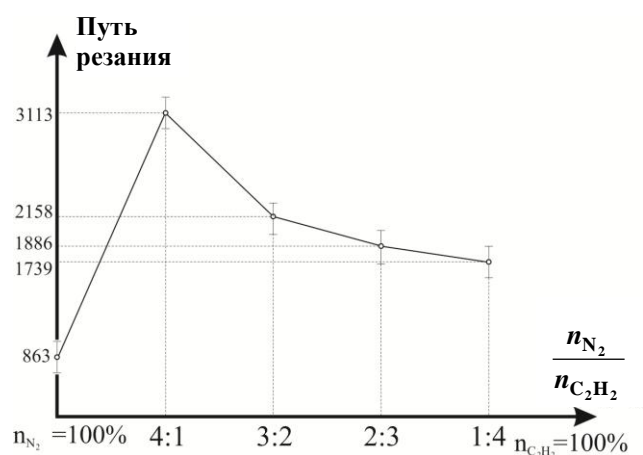


Рис. 10. График зависимости пути резания от соотношения реакционных газов
 Fig. 10. The graph of the cutting way dependence on the reaction gases ratio

азота к углероду до 2:3 (60 % углерода) позволяет увеличить микротвердость покрытия до 4870 HV. Однако дальнейшее увеличение содержания ацетилена приводит к резкому снижению микротвердости до 2983 HV.

Исследования на износостойкость инструмента показали, что инструмент с покрытием, полученным при соотношении концентрации азота к ацетилену 4:1, до критерия затупления проходит путь резания в 3113 м, что в 10 раз больше, чем для резцов без покрытия, и в 3,5 раза лучше, чем для резцов со стандартным покрытием Ti–Al–N. Анализ результатов измерения микротвердости и натуральных испытаний инструментов с покрытием показал, что результаты лабораторных исследований не совпадают с производственными испытаниями, так как все процессы, происходящие во время работы режущего инструмента, невозможно повторить в лабораторных условиях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ химического состава поверхности показал, что по мере износа покрытия на поверхность налипают обрабатываемый материал в небольшом количестве. Результаты исследования покрытий показали, что наи-

большее значение микротвердости наблюдается у покрытия, синтезированного в среде смеси реакционных газов азота и ацетилена с соотношением 2:3, при этом наиболее износостойким является покрытие с соотношением 4:1.

Испытания показали, что покрытие на основе системы TiAl, синтезированное в среде смеси реакционных газов азота и ацетилена с соотношением 4:1, позволяет синтезировать покрытие, которое повышает 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang B., Li A., Liu G. Cutting performance and wear mechanisms of TiAlN PVD-coated cemented carbide tool in high speed turning of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr alloy // Journal of Mechanical Science and Technology. 2020. Vol. 34. № 7. P. 2997–3006. DOI: [10.1007/s12206-020-0631-4](https://doi.org/10.1007/s12206-020-0631-4).
2. Sousa V.F.C., Silva F.J.G., Alexandre R., Fecheira J.S., Silva F.P.N. Study of the wear behaviour of TiAlSiN

- and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel // *Wear*. 2021. Vol. 476. Article number 203695. DOI: [10.1016/j.wear.2021.203695](https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203695).
3. Chang K., Dong Y., Zheng G., Jiang X., Yang X., Cheng X., Liu H., Zhao G. Friction and wear properties of TiAlN coated tools with different levels of surface integrity // *Ceramics International*. 2022. Vol. 48. № 4. P. 4433–4443. DOI: [10.1016/j.ceramint.2021.10.105](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.105).
 4. Sousa V.F.C., Da Silva F.J.G., Pinto G.F., Baptista A., Alexandre R. Characteristics and wear mechanisms of TiAlN-based coatings for machining applications: A comprehensive review // *Metals*. 2021. Vol. 11. № 2. Article number 260. DOI: [10.3390/met11020260](https://doi.org/10.3390/met11020260).
 5. Rashidi M., Tamizifar M., Ali Boutorabi S.M. Characteristics of TiAlCN ceramic coatings prepared via pulsed-DC PACVD, part I: influence of precursors' ratio // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. № 2. P. 1269–1280. DOI: [10.1016/j.ceramint.2019.06.303](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.303).
 6. Liu K., Ma F., Lou M., Dong M., Zhu Y., Wang Y., Wu X., Liu X., Li J. Structure and tribocorrosion behavior of TiAlCN coatings with different Al contents in artificial seawater by multi-arc ion plating // *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2021. Vol. 9. № 4. Article number 045004. DOI: [10.1088/2051-672X/ac1046](https://doi.org/10.1088/2051-672X/ac1046).
 7. Tillmann W., Grisales D., Marin Tovar C., Contreras E., Apel D., Nienhaus A., Stangier D., Lopes Dias N.F. Tribological behaviour of low carbon-containing TiAlCN coatings deposited by hybrid (DCMS/HiPIMS) technique // *Tribology International*. 2020. Vol. 151. Article number 106528. DOI: [10.1016/j.triboint.2020.106528](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106528).
 8. Chen S.N., Zhao Y.M., Zhang Y.F., Chen L., Liao B., Zhang X., Ouyang X.P. Influence of carbon content on the structure and tribocorrosion properties of TiAlCN/TiAlN/TiAl multilayer composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 411. Article number 126886. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2021.126886](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126886).
 9. Zeng Y., Qiu Y., Mao X., Tan S., Tan Z., Zhang X., Chen J., Jiang J. Superhard TiAlCN coatings prepared by radio frequency magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. 2015. Vol. 584. P. 283–288. DOI: [10.1016/j.tsf.2015.02.068](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.02.068).
 10. 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. Article number 126664. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2020.126664](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126664).
 11. Boing D., de Oliveira A.J., Schroeter R.B. Limiting conditions for application of PVD (TiAlN) and CVD (TiCN/Al₂O₃/TiN) coated cemented carbide grades in the turning of hardened steels // *Wear*. 2018. Vol. 416–417. P. 54–61. DOI: [10.1016/j.wear.2018.10.007](https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.10.007).
 12. Li S., Lin H., Zhang T., Sui J., Wang C. High-speed machining of malleable cast iron by various cutting tools coated by physical vapor deposition // *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*. 2021. Vol. 34. № 1. Article number 46. DOI: [10.1186/s10033-021-00561-8](https://doi.org/10.1186/s10033-021-00561-8).
 13. Vardanyan E.L., Budilov V.V. Technology of the deposition of composite coatings based on Ti-Al inter-metallic compounds by vacuum-arc plasma discharge // *Journal of Surface Investigation*. 2016. Vol. 10. № 4. P. 728–731. DOI: [10.1134/S1027451016040182](https://doi.org/10.1134/S1027451016040182).
 14. Верещака А.А., Табаков В.П. Исследование влияния архитектуры многослойного покрытия на работоспособность твердосплавного инструмента // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2019. Т. 15. № 9. С. 427–429. EDN: [FINJIK](https://www.edn.ru/finjik/).
 15. Zhao R., Ren X., Wen K., Liu H.N., Huang M., Wang Z., Deng Y. Multi-arc ion plating and DC magnetron sputtering integrated technique for high-performance Al,C-co-doped δ-TiN quaternary films // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 182. Article number 109261. DOI: [10.1016/j.corsci.2021.109261](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109261).
 16. Щипачев А.М., Варданян Э.Л., Мухамадеев В.Р., Мухамадеев И.Р. Исследование изменения твердости поверхности режущего инструмента с покрытием TiAlN // *Металлообработка*. 2021. № 3. С. 22–29. DOI: [10.25960/mo.2021.3.22](https://doi.org/10.25960/mo.2021.3.22).
 17. Щипачев А.М., Мигранов М.Ш., Мухамадеев В.Р., Мухамадеев И.Р. Влияние композиционного наноструктурного покрытия на изменение элементного состава в поверхностных слоях режущего инструмента // *Металлообработка*. 2019. № 5. С. 19–25. DOI: [10.25960/mo.2019.5.19](https://doi.org/10.25960/mo.2019.5.19).
 18. Рамазанов К.Н., Варданян Э.Л., Мухамадеев В.Р., Мухамадеев И.Р., Маслов А.А. Изменение химического состава поверхностных слоев твердосплавного инструмента с покрытием системы Ti-Al-N в процессе резания // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2022. № 6. С. 108–112. DOI: [10.31857/S1028096022040136](https://doi.org/10.31857/S1028096022040136).
 19. Липатов А.А., Чигиринский Ю.Л. Взаимодействие с вязким контактом при резании аустенитной стали твердосплавным инструментом // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020. № 1. С. 31–35. EDN: [YJGSGJ](https://www.edn.ru/yjgsgj/).
 20. Липатов А.А., Чигиринский Ю.Л. Особенности контактного взаимодействия при резании высоколегированных сталей твердосплавным инструментом // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2021. № 3. С. 31–34. DOI: [10.35211/1990-5297-2021-3-250-31-34](https://doi.org/10.35211/1990-5297-2021-3-250-31-34).

REFERENCES

1. Wang B., Li A., Liu G. Cutting performance and wear mechanisms of TiAlN PVD-coated cemented carbide tool in high speed turning of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr alloy. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, vol. 34, no. 7, pp. 2997–3006. DOI: [10.1007/s12206-020-0631-4](https://doi.org/10.1007/s12206-020-0631-4).
2. Sousa V.F.C., Silva F.J.G., Alexandre R., Fecheira J.S., Silva F.P.N. Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel. *Wear*, 2021, vol. 476, article number 203695. DOI: [10.1016/j.wear.2021.203695](https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203695).
3. Chang K., Dong Y., Zheng G., Jiang X., Yang X., Cheng X., Liu H., Zhao G. Friction and wear properties of TiAlN coated tools with different levels of surface integrity. *Ceramics International*, 2022, vol. 48, no. 4, pp. 4433–4443. DOI: [10.1016/j.ceramint.2021.10.105](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.105).

4. Sousa V.F.C., Da Silva F.J.G., Pinto G.F., Baptista A., Alexandre R. Characteristics and wear mechanisms of TiAlN-based coatings for machining applications: A comprehensive review. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 2, article number 260. DOI: [10.3390/met11020260](https://doi.org/10.3390/met11020260).
5. Rashidi M., Tamizifar M., Ali Boutorabi S.M. Characteristics of TiAlCN ceramic coatings prepared via pulsed-DC PACVD, part I: influence of precursors' ratio. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, no. 2, pp. 1269–1280. DOI: [10.1016/j.ceramint.2019.06.303](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.303).
6. Liu K., Ma F., Lou M., Dong M., Zhu Y., Wang Y., Wu X., Liu X., Li J. Structure and tribocorrosion behavior of TiAlCN coatings with different Al contents in artificial seawater by multi-arc ion plating. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2021, vol. 9, no. 4, article number 045004. DOI: [10.1088/2051-672X/ac1046](https://doi.org/10.1088/2051-672X/ac1046).
7. Tillmann W., Grisales D., Marin Tovar C., Contreras E., Apel D., Nienhaus A., Stangier D., Lopes Dias N.F. Tribological behaviour of low carbon-containing TiAlCN coatings deposited by hybrid (DCMS/HiPIMS) technique. *Tribology International*, 2020, vol. 151, article number 106528. DOI: [10.1016/j.triboint.2020.106528](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106528).
8. Chen S.N., Zhao Y.M., Zhang Y.F., Chen L., Liao B., Zhang X., Ouyang X.P. Influence of carbon content on the structure and tribocorrosion properties of TiAlCN/TiAlN/TiAl multilayer composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 411, article number 126886. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2021.126886](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126886).
9. Zeng Y., Qiu Y., Mao X., Tan S., Tan Z., Zhang X., Chen J., Jiang J. Superhard TiAlCN coatings prepared by radio frequency magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 2015, vol. 584, pp. 283–288. DOI: [10.1016/j.tsf.2015.02.068](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.02.068).
10. 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, article number 126664. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2020.126664](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126664).
11. Boing D., de Oliveira A.J., Schroeter R.B. Limiting conditions for application of PVD (TiAlN) and CVD (TiCN/Al₂O₃/TiN) coated cemented carbide grades in the turning of hardened steels. *Wear*, 2018, vol. 416–417, pp. 54–61. DOI: [10.1016/j.wear.2018.10.007](https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.10.007).
12. Li S., Lin H., Zhang T., Sui J., Wang C. High-speed machining of malleable cast iron by various cutting tools coated by physical vapor deposition. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 2021, vol. 34, no. 1, article number 46. DOI: [10.1186/s10033-021-00561-8](https://doi.org/10.1186/s10033-021-00561-8).
13. Vardanyan E.L., Budilov V.V. Technology of the deposition of composite coatings based on Ti-Al intermetallic compounds by vacuum-arc plasma discharge. *Journal of Surface Investigation*, 2016, vol. 10, no. 4, pp. 728–731. DOI: [10.1134/S1027451016040182](https://doi.org/10.1134/S1027451016040182).
14. Vereshchaka A.A., Tabakov V.P. Effect of multilayer coating architecture on serviceability of carbide tool. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2019, vol. 15, no. 9, pp. 427–429. EDN: [FINJIK](https://www.edn.net/FINJIK).
15. Zhao R., Ren X., Wen K., Liu H.N., Huang M., Wang Z., Deng Y. Multi-arc ion plating and DC magnetron sputtering integrated technique for high-performance Al,C-co-doped δ-TiN quaternary films. *Corrosion Science*, 2021, vol. 182, article number 109261. DOI: [10.1016/j.corsci.2021.109261](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109261).
16. Schipachev A.M., Vardanyan E.L., Mukhamadeev V.R., Mukhamadeev I.R. Investigation of changes in the surface hardness of coated cutting tools. *Metalloobrabotka*, 2021, no. 3, pp. 22–29. DOI: [10.25960/mo.2021.3.22](https://doi.org/10.25960/mo.2021.3.22).
17. Schipachev A.M., Migranov M.Sh., Mukhamadeev V.R., Mukhamadeev I.R. The influence of composite nanostructured coating on the change of elemental composition in the surface layers of the cutting tool. *Metalloobrabotka*, 2019, no. 5, pp. 19–25. DOI: [10.25960/mo.2019.5.19](https://doi.org/10.25960/mo.2019.5.19).
18. Ramazanov K.N., Vardanyan E.L., Mukhamadeev V.R., Mukhamadeev I.R., Maslov A.A. Change in the chemical composition of a carbide tool with Ti-Al-N coating surface layers during machining. *Journal of surface investigation: X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 2022, no. 3, pp. 412–415. DOI: [10.1134/S1027451022020355](https://doi.org/10.1134/S1027451022020355).
19. Lipatov A.A., Tchigirinskiy Yu.L. Interaction with a viscous contact when cutting austenitic steel with a carbide tool. *Izvestia VSTU*, 2020, no. 1, pp. 31–35. EDN: [YJGSGJ](https://www.edn.net/YJGSGJ).
20. Lipatov A.A., Tchigirinskiy Yu.L. Features of contact interaction in cutting high-alloy steels with carbide tools. *Izvestia VSTU*, 2021, no. 3, pp. 31–34. DOI: [10.35211/1990-5297-2021-3-250-31-34](https://doi.org/10.35211/1990-5297-2021-3-250-31-34).

The study of influence of the reaction gases ratio at the Ti–Al–C–N coating deposition on the cutting tool wear resistance

© 2022

Kamil N. Ramazanov¹, Doctor of Sciences (Engineering),

Associate Professor, professor of Chair of Mechanical Engineering

Eduard L. Vardanyan², Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor,

assistant professor of Chair of Mechanical Engineering

Vener R. Mukhamadeev^{*3}, senior lecturer of Chair of Mechanics and Digital Design

Almaz Yu. Nazarov⁴, PhD (Engineering), Associate Professor, assistant professor of Chair of Mechanical Engineering

Ilshat R. Mukhamadeev⁵, senior lecturer of Chair of Welding, Foundry and Additive Technologies

Aleksey A. Nikolaev⁶, assistant of Chair of Mechanical Engineering

Ufa State Aviation Technical University, Ufa (Russia)

*E-mail: vener_muhamadeev@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7962-5964>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7047-6459>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2018-4877>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4711-4721>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5998-4994>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2584-4790>

Received 06.05.2022

Accepted 01.08.2022

Abstract: The paper presents the results of the study of the component composition of the reaction gases mixture when synthesizing carbonitride coatings of the Ti–Al–C–N system influencing the cutting tool durability. The coating was applied using the updated unit NNV-6.6-II by spraying from two one-component cathodes assisted by the incandescent cathode plasma source. During applying the coating, the mixture of reaction gases of N₂ nitrogen and C₂H₂ acetylene in the ratio of 1:4, 2:3, 3:2, and 4:1 was delivered to the chamber. The paper presents the results of measuring the microhardness of studied specimens, which show that a sample with the coating deposited at the reaction gases ratio of N₂:C₂H₂=2:3 had the largest microhardness value (4870 HV0.05). The paper presents the results of field tests of carbide-tipped tools with the studied coatings. Durability tests identified that a cutter with the coating deposited at the gas ratio of N₂:C₂H₂=4:1 increases the tool durability ten times compared to a cutting tool without coating. Using the electron microscopy method, the authors investigated the chemical composition of the tool cutting face after tests. The analysis of the chemical composition of the surface after cutting showed that the content of coating elements on the surface of the sample with a coating deposited at the 4:1 ratio of the reaction gases of nitrogen and acetylene was considerably higher than that of other studied coatings, which indicates the less coating wear. However, ferrum is present in some areas of the cutting face, which says about the adhesion of treated material to the tool.

Keywords: titanium; aluminum; coating; cutting tool; carbonitrides; wear resistance; microhardness.

Acknowledgements: The work was supported by the grant MK-4991.2022.4 of the President of the Russian Federation.

For citation: Ramazanov K.N., Vardanyan E.L., Mukhamadeev V.R., Nazarov A.Yu., Mukhamadeev I.R., Nikolaev A.A. The study of influence of the reaction gases ratio at the Ti–Al–C–N coating deposition on the cutting tool wear resistance. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 3, pp. 32–43. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-2-32-43.