



УДК 621.793  
DOI: 10.21122/1683-6065-2019-1-112-118

Поступила 05.10.2018  
Received 05.10.2018

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ Ti–Cr–B–N МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

*С. Д. ЛАТУШКИНА, И. М. РОМАНОВ, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10, E-mail: phti@tut.by,  
А. Р. ЛУЧЕНОК, Обособленное хозяйственное подразделение НИИ импульсных процессов с опытным производством ГНУ «Институт порошковой металлургии», г. Минск, Беларусь,  
О. И. ПОСЫЛКИНА, Ю. А. ХАРЛАН, Я. Ю. МАРТИНКЕВИЧ, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: phti@tut.by*

*Приведены результаты исследования фазового состава и физико-механических свойств многокомпонентных покрытий Ti–Cr–B–N, сформированных методом магнетронного распыления на постоянном токе из композиционных мишеней. Изучены особенности фазообразования покрытий при распылении мишеней, содержащих в качестве боросодержащего компонента диборид титана (TiB<sub>2</sub>) или нитрид бора (BN). Установлены условия осаждения покрытий с микротвердостью до 32 ГПа и термостойкостью вплоть до 800 °С.*

**Ключевые слова.** Магнетронное распыление, мишень, термостойкость, микротвердость.

**Для цитирования.** Латушкина, С. Д. Технологические особенности формирования покрытий Ti–Cr–B–N методом магнетронного распыления на постоянном токе / С. Д. Латушкина, И. М. Романов, А. Р. Лученок, О. И. Посылкина, Ю. А. Харлан, Я. Ю. Мартинкевич // *Литье и металлургия*. 2019. № 1. С. 112–118. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-1-112-118.

## TECHNOLOGICAL FEATURES OF Ti–Cr–B–N COATINGS FORMATION BY MAGNETRON SPUTTERING METHOD IN A DIRECT CURRENT

*S. D. LATUSHKINA, I. M. ROMANOV, Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevicha str. E-mail: phti@tut.by,  
A. R. LUCHENOK, Standalone Commercial Unit «Research Institute of impulse process with pilot production» of State Scientific «Institute of Powder Metallurgy», Minsk, Belarus,  
O. I. POSYLKINA, YU. A. HARLAN, YA. YU. MARTINKEVICH, Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevicha str. E-mail: phti@tut.by*

*The results of the study of the phase composition and physical and mechanical properties of multicomponent coatings Ti–Cr–B–N formed by magnetron sputtering at a constant current from composite targets are presented. The features of phase formation of coatings when spraying targets containing titanium diboride (TiB<sub>2</sub>) or boron nitride (BN) as a boron-containing component are studied. The conditions of deposition of coatings with microhardness up to 32 GPA and heat resistance up to 800 °C are established.*

**Keywords.** Magnetron sputtering, target, heat resistance, microhardness.

**For citation.** Latushkina S. D., Romanov I. M., Luchenok A. R., Posylkina O. I., Harlan Yu. A., Martinkevich Ya. Yu. Technological features of Ti–Cr–B–N coatings formation by magnetron sputtering method in a direct current. *Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 1, pp. 112–118. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-1-112-118.

### Введение

При разработке новых видов покрытий основные усилия направлены на придание им качественно новых характеристик и многофункциональности, что, помимо высокой твердости и износостойкости, включает низкий коэффициент трения, высокую термическую стабильность, стойкость к циклическим ударным нагрузкам, жаро- и коррозионную стойкость, адгезионную прочность [1–3]. Практика показы-

вает, что физико-механическими свойствами конденсатов можно варьировать в широких пределах путем изменения размеров и кристаллографической ориентации зерен в растущей пленке, а также структуры и свойств границ их раздела, т. е. формировать наноразмерную структуру. Выделяют несколько способов [3, 4]: ионную бомбардировку при осаждении покрытий; внедрение дополнительных элементов в основной материал; осаждение многослойных пленок со слоями нанометровой толщины; формирование нанокompозитных покрытий.

Наиболее распространенным с технологической точки зрения является введение дополнительных элементов в основной материал покрытия (в частности, нитрид титана) [5, 6]. Такие покрытия состоят из основной твердой нанокристаллической фазы, на границах зерен которой располагается тонкий слой второй нанокристаллической или аморфной фазы, препятствующей росту зерен основной фазы. Другими словами, твердые зерна первой фазы отделены друг от друга, покрыты тонким слоем атомов другой фазы, сегрегированных на их поверхностях [7]. Структурные составляющие таких покрытий должны удовлетворять ряду требований: иметь ограниченную смешиваемость в твердом состоянии, термодинамически обусловленную сегрегацию в ходе синтеза, определенное химическое сродство друг к другу для усиления межфазного взаимодействия на границах нанозерен.

В последнее десятилетие упрочняющие покрытия прошли эволюцию от простых нитридов (TiN, CrN и др.) к многокомпонентным и многослойным покрытиям на их основе (Ti–Al–N, Ti–Cr–N, AlCrN, CrN/AlN). Особый интерес представляет легирование многокомпонентных покрытий бором, так как некоторые соединения бора характеризуются высокой твердостью и термической стабильностью [7, 8]. Так, диборид титана по сравнению с другими диборидами переходных металлов IV–VI групп обладает наибольшей стабильностью решетки, что обеспечивает его высокую твердость и температуру плавления и делает его одним из наиболее перспективных материалов, характеризующихся высокой износ- и термостойкостью. Нитрид бора является соединением, родственным по своим структурным и физико-химическим свойствам модификациям углерода [9, 10]. При определенном сочетании элементов в многокомпонентном покрытии можно обеспечить комплекс необходимых защитных свойств, что на сегодняшний день представляет как научный, так и практический интерес.

Магнетронное распыление по сравнению с другими методами нанесения покрытий обладает рядом преимуществ, основными из которых являются высокая скорость роста покрытий, их хорошая адгезия и незначительное загрязнение посторонними газовыми включениями; низкая температура нагрева основы; возможность распыления как проводников, так и диэлектриков и получение сверхтонких (менее 20 нм) покрытий с меньшими радиационными дефектами.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании особенностей формирования покрытий Ti–Cr–B–N методом магнетронного распыления многокомпонентных мишеней различного состава, выборе оптимального состава мишеней и определении физико-механических свойств формируемых покрытий.

**Методика эксперимента.** Многокомпонентные мишени изготавливали методом импульсного прессования с применением бризантных взрывчатых веществ смеси порошков Ti, Cr. Введение бора (B) в систему элементов Ti–Cr при изготовлении мишеней осуществляли двумя вариантами: добавлением диборида титана (TiB<sub>2</sub>) или нитрида бора (BN).

При прессовании мишеней была использована двухстадийная технология получения материалов мишени, включающая предварительную импульсную подпрессовку смеси порошков, размол прессовок до размеров гранул меньше 315 мкм и импульсное прессование заготовок мишеней из полученных гранул по плоской схеме с генератором плоской ударной волны, прошедшая ранее апробацию при получении мишеней Ti–Al, Ti–Zr [11, 12].

Спекание прессовок проводили при температуре 900–1300 °С в вакууме порядка 10<sup>-1</sup> Па. Выдержка на режиме спекания 1,5 ч. Спрессованные мишени имели диаметр 46 мм, толщину – 2,0–2,3 мм и относительную плотность – 86–87% от теоретической.

Осаждение покрытий (Ti, Cr, B)N осуществляли в вакууме 10<sup>-3</sup> Па посредством магнетронного распыления мишени при введении в камеру смеси аргона и азота и работе магнетрона на постоянном токе. Для улучшения адгезии покрытий подложки облучали потоком ионов аргона с энергией 1,0 кэВ и плотностью тока на подложке 5 мА/см<sup>2</sup>.

В качестве подложек использовали пластины твердого сплава ВК-3М, монокристаллического кремния с ориентацией (100) и нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Рентгеноструктурный анализ покрытий проводили с помощью дифрактометра ДРОН-3 в интервале углов 30–120° в фильтрованном CuK<sub>α</sub>-излучении. Использование основных характеристик дифракционных максимумов позволило рас-

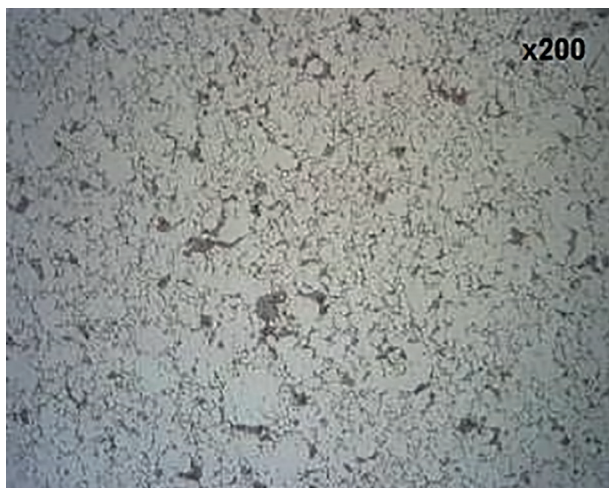


Рис. 1. Микроструктура материала мишени

считать параметр решетки ( $d$ ), размер областей когерентного рассеяния ( $L$ ) и уровень остаточных напряжений ( $\sigma$ ) материала осаждаемых покрытий. Поверхность и структуру пленок исследовали на растровом электронном микроскопе РЭМ S-4800 Hitachi. Элементный состав покрытий определяли электронным микросондом JEOL JXA 8500-F. Коэффициент трения осажденных покрытий измеряли на трибометре при следующих параметрах: контртело – шарик из стали ШХ15 диаметром 5,5 мм, нагрузка на контртело – 0,4 Н, скорость – 120 об/мин, радиус – 10 мм. Микротвердость покрытия измеряли нанотвердомером DuraTip при нагрузке 25 г. Термический отжиг проводили на воздухе в течение 1 ч при температурах в диапазоне  $T = 25\text{--}850\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Результаты исследования.** Необходимым условием стабильности процесса магнетронного распыления

является обеспечение необходимой плотности мишеней для распыления их в тлеющем разряде. Исследуемые составы прессуемых мишеней можно рассматривать как смеси порошков титана и хрома с инертной добавкой нитрида бора (или диборида титана), которые до определенных температур спекания не взаимодействуют с основными материалами. Для оптимизации процесса получения мишеней были проведены исследования влияния температуры спекания на плотность прессовок различного состава.

Как показали результаты исследования, при увеличении температуры спекания до  $1100\text{--}1300\text{ }^\circ\text{C}$  происходит повышение плотности прессовок, имеющих в своем составе  $\text{TiB}_2$ , в то время как оптимальной температурой спекания образца с BN оказалась  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , превышение которой было нецелесообразно, так как приводило к некоторому снижению плотности прессовки, что, по-видимому, может быть связано с перераспределением азота в объеме заготовки. Формоизменения прессовок при данных температурах не происходило, формировалась их плотная структура (рис. 1).

Известно, что соотношение элементов в покрытии существенно влияет на твердость последних [13–15]. Для оптимизации составов используемых мишеней были проведены исследования микротвердости осаждаемых покрытий на подложках из твердого сплава ВК-3М в зависимости от состава мишеней (рис. 2).

Установлено, что повышенные значения микротвердости покрытий до  $30\text{--}33\text{ ГПа}$  достигаются при распылении мишеней с составом  $65\text{ вес.}\% \text{ Ti} + 20\text{ вес.}\% \text{ Cr} + 15\text{ вес.}\% \text{ TiB}_2$  и  $65\text{ вес.}\% \text{ Ti} + 20\text{ вес.}\% \text{ Cr} + 15\text{ вес.}\% \text{ BN}$ . Как следует из полученных результатов, прямое увеличение в составе мишени борсодержащих соединений не приводит к повышению микротвердости покрытий. Таким образом, подтверждается факт необходимости оптимального соотношения компонентов в формируемых покрытиях.

Характерной особенностью технологических процессов получения пленок для всех применяемых в данной работе мишеней является существенная зависимость значений рабочих электрических параметров магнетрона и соответственно скорости распыления и роста пленок от величины общего давления газовой смеси ( $\text{Ar} + \text{N}_2$ ) и парциального давления азота. Уменьшение содержания азота в газовой смеси,

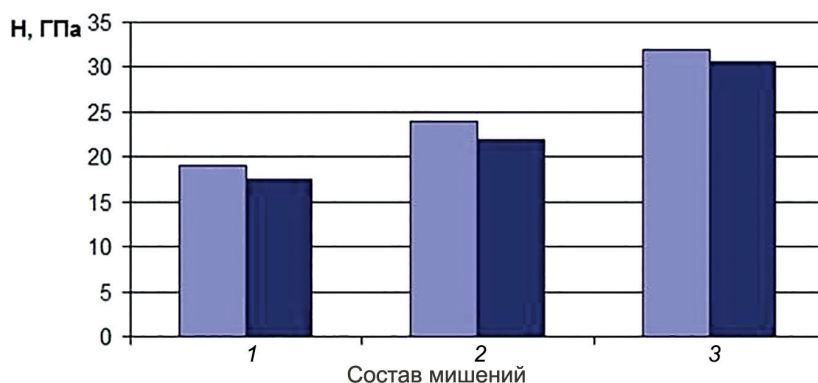


Рис. 2. Микротвердость осаждаемых покрытий в зависимости от состава мишеней: 1 –  $30\text{ вес.}\% \text{ Ti} + 40\text{ вес.}\% \text{ Cr} + 30\text{ вес.}\% \text{ TiB}_2$  (BN); 2 –  $35\text{ вес.}\% \text{ Ti} + 30\text{ вес.}\% \text{ Cr} + 35\text{ вес.}\% \text{ TiB}_2$  (BN); 3 –  $65\text{ вес.}\% \text{ Ti} + 20\text{ вес.}\% \text{ Cr} + 15\text{ вес.}\% \text{ TiB}_2$  (BN)

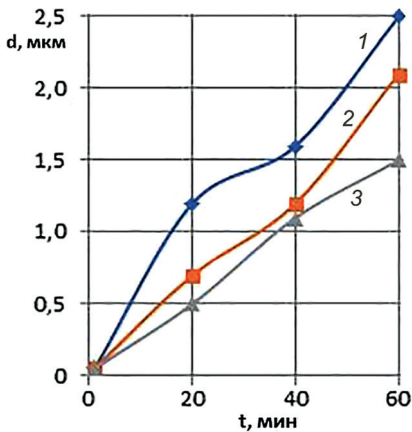


Рис. 3. Временная зависимость толщины пленок Ti-Cr-B-N при различных значениях парциального давления азота (общее давление газовой смеси  $(N_2 + Ar) \cdot 3,6 \cdot 10^{-1}$  Па): 1 –  $1,3 \cdot 10^{-2}$  Па; 2 –  $1,5 \cdot 10^{-2}$ ; 3 –  $1,7 \cdot 10^{-2}$  Па

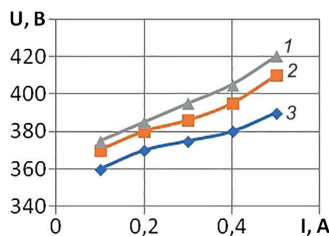


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика магнетрона при парциальном давлении азота  $1,5 \cdot 10^{-2}$  Па и различных значениях общего давления газовой смеси  $(N_2 + Ar)$ : 1 –  $3,8 \cdot 10^{-1}$  Па; 2 –  $3,3 \cdot 10^{-1}$ ; 3 –  $1,4 \cdot 10^{-1}$  Па

подаваемой в камеру во время распыления мишени, ведет к увеличению скорости распыления мишени и роста пленки (рис. 3).

Кроме того, с уменьшением величины общего давления газовой смеси кривая вольт-амперной характеристики смещается в область больших рабочих напряжений (рис. 4).

Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, независимо от состава исходной мишени в осаждаемых покрытиях определяется наличие только одной фазы – соединения  $(Ti, Cr)N$  в виде твердого раствора замещения титана хромом со структурой нитрида титана TiN и решеткой ГЦК-типа (рис. 5).

Для покрытия Ti-Cr-B-N, сформированного с использованием композиционной мишени, содержащей  $TiB_2$  (рис. 5), интенсивность отражения от кристаллографической плоскости (111) имеет ярко выраженный пик, в то время как при распылении мишени, содержащей BN, покрытие не имеет четко выделенной текстуры. Линии, соответствующие бору и его соединениям, на дифрактограммах отсутствуют в обоих случаях. Такой результат может свидетельствовать об аморфности фаз, связанных с бором. Оценка значения параметра решетки полученного соединения доказывает образование основной фазы твердого раствора на основе решетки нитрида титана. Это связано с более низкой теплотой образования TiN ( $-336,8$  кДж/(г·атом)) по сравнению с CrN ( $-118,0$  кДж/(г·атом)). Размер зерна, рассчитанный по уравнению Селякова-Шерера, для покрытий, полученных распылением мишеней с  $TiB_2$  и BN, составил 15 и 7 нм соответственно.

Сравнительный анализ значений коэффициентов трения покрытий показал, что введение в состав покрытий бора позволяет значительно снизить этот показатель (рис. 6). Более низкие значения коэффициента трения покрытий, полученных при распылении мишеней, содержащих нитрид бора, по-видимому, обусловлены их аморфной структурой.

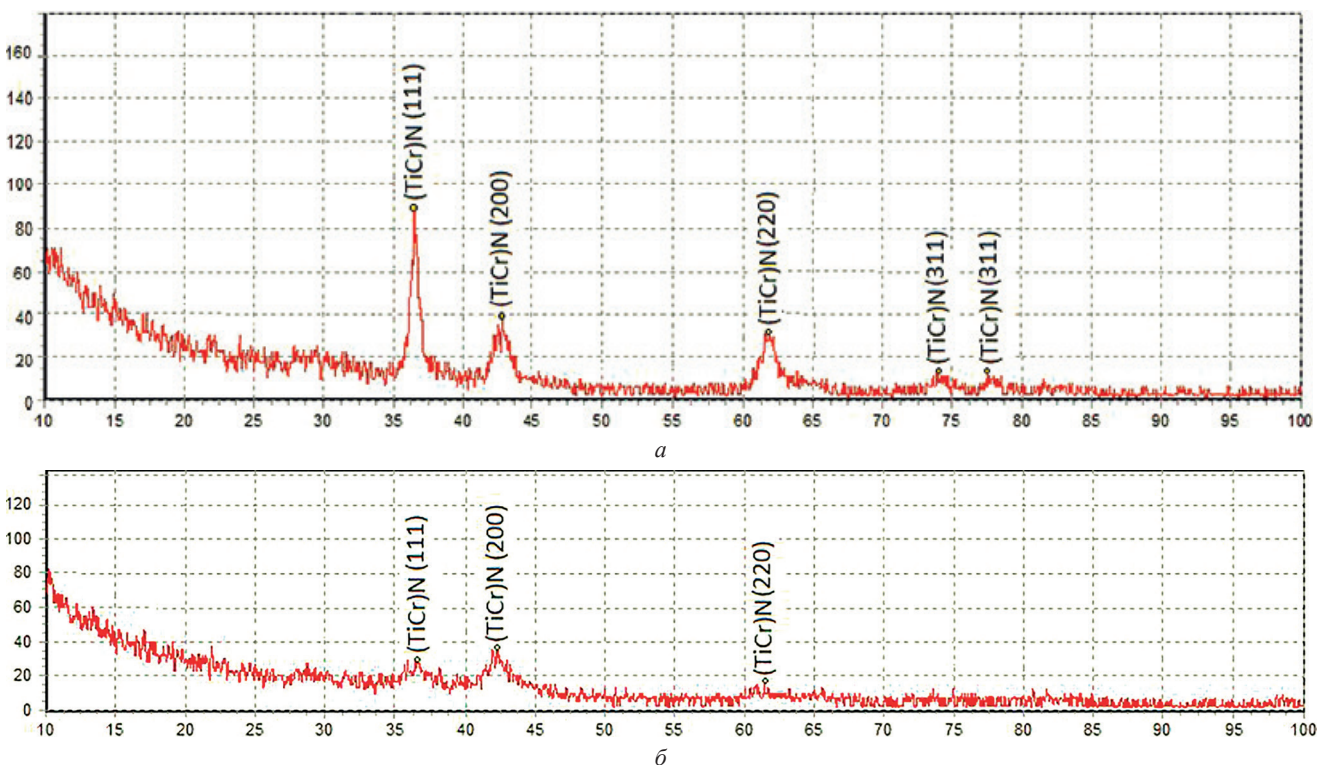


Рис. 5. Рентгеновские дифрактограммы покрытий Ti-Cr-B-N, полученные распылением мишеней разного состава: а – 65 вес.% Ti + 20 вес.% Cr + 15 вес.%  $TiB_2$ ; б – 65 вес.% Ti + 20 вес.% Cr + 15 вес.% BN

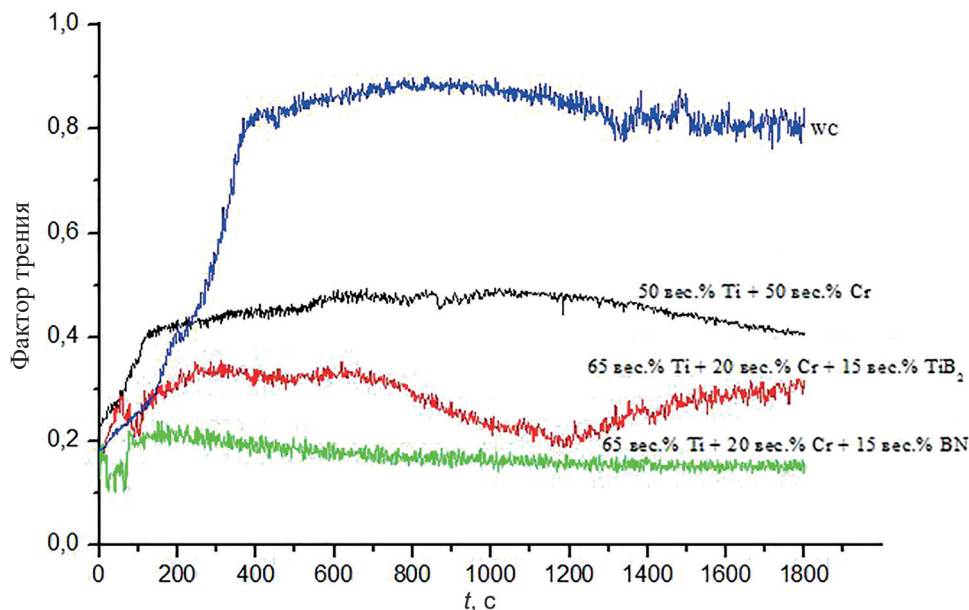


Рис. 6. Зависимость величины коэффициента трения покрытий на твердом сплаве от состава распыляемых мишеней

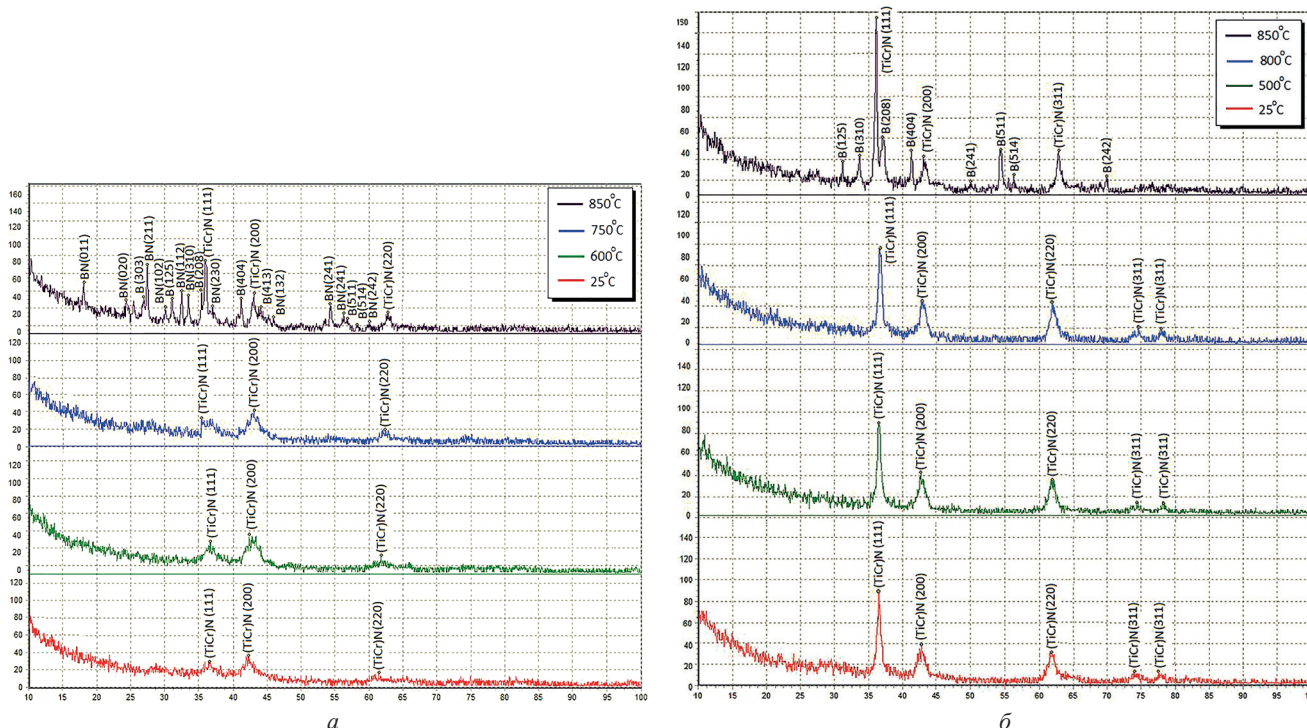


Рис. 7. Рентгеновские дифрактограммы покрытий Ti–Cr–B–N до и после отжига, полученные распылением мишеней разного состава: а – 65 вес.% Ti + 20 вес.% Cr + 15 вес.% TiB<sub>2</sub>; б – 65 вес.% Ti + 20 вес.% Cr + 15 вес.% BN

Необходимо отметить, что достаточно важным свойством осаждаемых покрытий является также их термическая стабильность. Это связано с тем, что в процессе эксплуатации различных режущих инструментов и деталей с покрытием их поверхностный слой может подвергаться не только механическому и химическому воздействиям, но и тепловому, что также вызывает потерю работоспособности данных изделий. Под действием высоких температур может происходить изменение структуры, элементного и фазового составов многих покрытий, что в свою очередь приводит к снижению основных защитных свойств и повреждению поверхности изделий. Поэтому исследование влияния высоких температур на структуру и свойства осаждаемых покрытий представляется достаточно актуальным.

Результаты рентгеноструктурного анализа покрытий Ti–Cr–B–N после отжига представлены на рис. 7.

Анализ полученных данных показал, что покрытия, полученные магнетронным распылением мишени, содержащей в своем составе диборид титана, сохраняют однофазность структуры с увеличением температуры отжига вплоть до значения 800 °С. В то же время покрытия, полученные распылением ми-

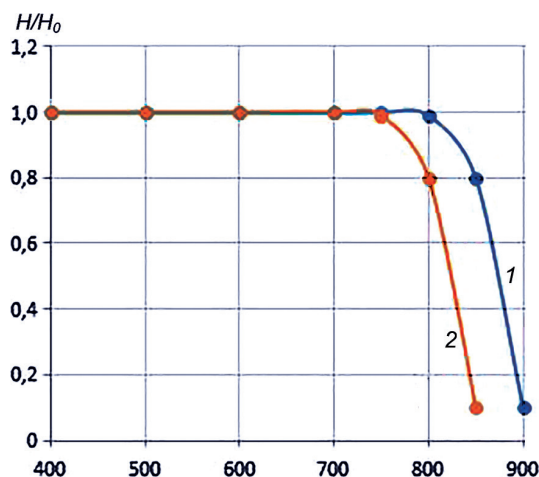


Рис. 8. Изменение микротвердости  $H$  покрытий (Ti, Cr, B)N после отжига на воздухе в течение 1 ч при получении покрытий с помощью магнетронного распыления мишеней различного состава ( $H_0$  – микротвердость покрытий при 25 °C): 1 – состав мишени 65 вес.% Ti + 20 вес.% Cr + 15 вес.% TiB<sub>2</sub>; 2 – состав мишени 65 вес.% Ti + 20 вес.% Cr + 15 вес.% BN

и решеткой ГЦК-типа, входящей в виде кристаллических зерен в квазиаморфную матрицу соединений бора.

Установлено, при определенном сочетании технологических параметров при распылении мишеней с составами 65 вес.% Ti + 20 вес.% Cr + 15 вес.% TiB<sub>2</sub> и 65 вес.% Ti + 20 вес.% Cr + 15 вес.% BN осаждаемые на подложках покрытия имеют высокие эксплуатационные свойства – микротвердость до 32 ГПа и коэффициент трения 0,2–0,3. Применение композиционной мишени, содержащей в своем составе диборид титана, при магнетронном распылении позволяет формировать покрытия с термостойкостью вплоть до 800 °C.

шени с нитридом бора, сохраняют гомогенность фазового состава до температуры только 750 °C. Причем одновременно с сохранением структуры покрытия сохраняют высокие значения микротвердости 30–32 ГПа (рис. 8).

После отжига при температуре 850 °C для покрытий, полученных распылением мишени состава 65 вес.% Ti + 20 вес.% Cr + 15 вес.% TiB<sub>2</sub>, наблюдаются кристаллизация и выделение в ее составе дополнительной фазы чистого бора (B), а для покрытий, полученных распылением мишени состава 65 вес.% Ti + 20 вес.% Cr + 15 вес.% BN, в составе появляется фаза BN. Одновременно с выделением новых фаз происходит резкое уменьшение микротвердости покрытий (рис. 8).

### Выводы

Проведены исследования особенностей формирования покрытий Ti–Cr–B–N, полученных методом магнетронного распыления композиционных мишеней различного состава. Установлено, что данные покрытия содержат в своем составе фазы соединения (Ti, Cr)N в виде твердого раствора замещения титана хромом со структурой нитрида титана TiN

### ЛИТЕРАТУРА

- Внуков Ю. Н. О влиянии PVD покрытий на условия резания, износ и стойкость инструмента / Ю. Н. Внуков, Е. Б. Козлова, Э. Б. Кондратюк // Современные технологии в машиностроении. Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. Вип. 10. С. 86–113.
- Технология тонких пленок: справ. / Под ред. Л. Майссела, Р. Лэнга. М.: Советское радио, 1977. Т. 1. 664 с.
- Верещака А. С. Некоторые методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента. Современные технологии в машиностроении. Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. С. 210–232.
- Андриевский Р. А. Сверхтвердые наноструктурные материалы на основе тугоплавких соединений // Функциональные материалы. 2007. Т. 1. № 4. С. 129–133.
- Локтев Ю. Д. Наноструктурные покрытия высокопроизводительного инструмента // Стружка. 2004. № 2(5). С. 12–17.
- Дробышевская А. А. Нанокompозитные покрытия на основе нитридов переходных металлов / А. А. Дробышевская, Г. А. Сердюк, Е. В. Фурсова, В. М. Береснев // ФИП. 2008. Т. 6. № 1–2. С. 81–88.
- Балабанов В. И. Нанотехнологии. Наука будущего. М.: Эксмо, 2009. 256 с.
- Клинская-Руденская Н. А. О влиянии тугоплавких добавок на структуру и свойства покрытий из самофлюсующихся сплавов / Н. А. Клиньская-Руденская, Б. П. Кузьмин // Физика и химия обработки материалов. 1996. № 1. С. 55–61.
- Юпшская-Руденская Н. А. Особенности композиционных покрытий на основе Ni–Cr–B–Si сплавов. Исследование износостойкости покрытий / Н. А. Юпшская-Руденская, В. А. Копысов, С. В. Коцот // Физика и химия обработки материалов. 1994. № 6. С. 52–57.
- Курдюмов А. В. Полиморфные модификации углерода и нитрида бора / А. В. Курдюмов, В. Г. Малооголовец, Н. В. Новиков, А. Н. Пилянкевич. М., 1994. 212 с.
- Komarov F. F. Formation of Nanostructured TiAlN, TiCrN, and TiSiN coatings using magnetron sputtering / F. F. Komarov, S. V. Konstantinov, V. V. Pilko // Journal of Friction and Wear. 2014. Vol. 35. N 3. P. 215–223.
- Mattias S. On the film density using high power impulse magnetron sputtering // Surface and Coatings Technology. 2010. Vol. 205. N 2. P. 591–596.
- Латушкина С. Д., Романов И. М., Жижченко А. Г., Мартинкевич Я. Ю., Харлан Ю. А. Исследование особенностей формирования многокомпонентных покрытий (Ti, Zr)N вакуумно-плазменными методами // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2017. С. 167–175.
- Романов И. М., Лученок А. Р., Посылкина О. И., Харлан Ю. А. Исследование особенностей многокомпонентных Ti–Al–N покрытий способом магнетронного распыления композиционных мишеней различного состава // Современные методы

и технологии создания и обработки материалов. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2018. С. 218–228.

15. **Латушкина С. Д., Романов И. М., Жижченко А. Г., Посылкина О. И.** Вакуумно-дуговые наноструктурные покрытия на основе нитрида титана // Перспективные материалы. М. 2014. № 6. С. 49–55.

## REFERENCES

1. **Vnukov Ju. N., Kozlova E. B., Kondratjuk Je. B.** O vlijanii PVD pokrytij na uslovija rezanija, iznos i stojkost' instrumenta [On the effect of PVD coatings on cutting conditions, wear and tool durability]. *Sovremennye tehnologii v mashinostroenii = Modern technologies in mechanical engineering*. Har'kov, NTU «HPI» Publ., 2015, vip. 10, pp. 86–113.
2. **Tehnologija tonkih plenok: Spravochnik** [Thin Film Technology: Handbook]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1977, vol. 1, 664 p.
3. **Vereshhaka A. S.** *Nekotorye metodologicheskie principy sozdaniya funkcional'nyh pokrytij dlja rezhushhego instrumenta. Sovremennye tehnologii v mashinostroenii* [Some methodological principles of creating functional coatings for cutting tools. Modern technologies in mechanical engineering]. Har'kov, NTU «HPI» Publ., 2007, pp. 210–232.
4. **Andrievskij R. A.** Sverhtverdye nanostrukturnye materialy na osnove tugoplavkih soedinenij [Superhard nanostructured materials based on refractory compounds]. *Funkcional'nye materialy = Functional materials*. 2007, vol. 1, no. 4, pp. 129–133.
5. **Loktev Ju. D.** Nanostrukturnye pokrytija vysokoproizvoditel'nogo instrumenta [Nanostructured coatings for high-performance tools]. *Struzhka = Shavings*, 2004, no. 2(5), pp. 12–17.
6. **Drobyshevskaja A. A., Cerdjuk G. A., Fursova E. V., Beresnev V. M.** Nanokompozitnye pokrytija na osnove nitridov perehodnyh metallov [Nanocomposite coatings based on transition metal nitrides]. *FIP*, 2008, vol. 6, no. 1–2, pp. 81–88.
7. **Balabanov V. I.** *Nanotehnologii. Nauka budushhego* [Nanotechnology. Science of the future]. Moscow, Jeksmo Publ., 2009, 256 p.
8. **Klinskaja-Rudenskaja N. A., Kuz'min B. P.** O vlijanii tugoplavkih dobavok na strukturu i svojstva pokrytij iz samoflujusjushhihsja splavov [On the effect of refractory additives on the structure and properties of coatings from self-fluxing alloys]. *Fizika i himija obrabotki materialov = Physics and chemistry of materials processing*, 1996, no. 1, pp. 55–61.
9. **Jupshskaja-Rudenskaja N. A., Kopysov V. A., Kocot S. V.** Osobennosti kompozicionnyh pokrytij na osnove Ni–Cr–B–Si splavov. Issledovanie iznosostojkosti pokrytij [Features of composite coatings based on Ni–Cr–B–Si alloys]. *Fizika i himija obrabotki materialov = Physics and chemistry of materials processing*, 1994, no. 6, pp. 52–57.
10. **Kurdjumov A. V., Malogolovec V. G., Novikov N. V., Piljankevich A. N.** *Polimorfnye modifikacii ugljeroda i nitrída bora* [Polymorphic modifications of carbon and boron nitride]. Moscow, 1994, 212 p.
11. **Komarov F. F., Konstantinov S. V., Pilko V. V.** Formation of Nanostructured TiAlN, TiCrN, and TiSiN coatings using magnetron sputtering. *Journal of Friction and Wear*, 2014, vol. 35, no. 3, pp. 215–223.
12. **Mattias S.** On the film density using high power impulse magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 205, no. 2, pp. 591–596.
13. **Latushkina S. D., Romanov I. M., Zhizhchenko A. G., Martinkevich Ja. Ju., Harlan Ju. A.** Issledovanie osobennostej formirovanija mnogokomponentnyh pokrytij (Ti, Zr) N vakuumno-plazmennymi metodami [Study of the features of the multicomponent coatings (Ti, Zr) N formation by vacuum-plasma methods]. *Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Tehnologii i oborudovanie mehanicheskoi i fiziko-tehnicheskoi obrabotki = Modern methods and technologies for the creation and processing of materials. Technologies and equipment for mechanical and physico-technical processing*. Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2017, pp. 167–175.
14. **Romanov I. M., Luchenok A. R., Posylkina O. I., Harlan Ju. A.** Issledovanie osobennostej mnogokomponentnyh Ti–Al–N pokrytij sposobom magnetronnogo raspylenija kompozicionnyh mishenej razlichnogo sostava [Study of the multicomponent Ti–Al–N coatings characteristics by the method of magnetron sputtering composite targets of different composition] / *Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Tehnologii i oborudovanie mehanicheskoi i fiziko-tehnicheskoi obrabotki = Modern methods and technologies for the creation and processing of materials. Technologies and equipment for mechanical and physico-technical processing*. Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2018, pp. 218–228.
15. **Latushkina S. D., Romanov I. M., Zhizhchenko A. G., Posylkina O. I.** Vakuumno-dugovye nanostrukturnye pokrytija na osnove nitrída titana [Vacuum-arc nanostructured coatings based on titanium nitride]. *Perspektivnye materialy = Perspective materials*. 2014, no. 6, pp. 49–55.