

## ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КАТОДОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ, ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СВЕРХТВЕРДЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

**В.М. Береснев<sup>1,2</sup>, П.В. Турбин<sup>1,2</sup>, В.В. Грудницкий<sup>1</sup>, И.Н. Торяник<sup>1</sup>,  
А.Е. Дмитренко<sup>3</sup>, А.Ю. Кропотов<sup>1,2</sup>, В.И. Гриценко<sup>1</sup>,  
Л.В. Маликов<sup>2</sup>, С.С. Гранкин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина

<sup>2</sup>Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины, Харьков, Украина

<sup>3</sup>Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",  
Украина

Поступила 29.04.2013

Изложены методы формирования и результаты применения многокомпонентных катодов, получаемых электронно-лучевым плавлением для формирования сверхтвердых покрытий на основе Zr, Ti, Si и N и Ti, Hf, Si и N способом вакуумно-дугового осаждения. Исследовано соответствие элементного состава синтезированных покрытий составу распыляемого катода.

**Ключевые слова:** вакуумно-дуговой метод осаждения, катод, наноккомпозитные покрытия, электронно-лучевое плавление.

## ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ КАТОДІВ, ОТРИМАНИХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ ПЛАВЛЕННЯМ, ДЛЯ ФОРМУВАННЯ НАДТВЕРДИХ НАНОКОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ

**В.М. Береснев, П.В. Турбін, В.В. Грудницький, І.М. Торяник, О.Є. Дмитренко,  
О.Ю. Кропотов, В.І. Гриценко, Л.В. Маліков, С.С. Гранкін**

Викладені методи формування і результати застосування багатоконпонентних катодів, отриманих електронно-променеви́м плавленням для формування надтвердих покриттів на основі Zr, Ti, Si і N та Ti, Hf, Si і N способом вакуумно-дугового осадження. Досліджено відповідність елементного складу синтезованих покриттів складу розпиленого катоду.

**Ключові слова:** вакуумно-дуговий метод осадження, електронно-промене́ве плавлення, катод, наноккомпозитні покриття.

## APPLICATION OF MULTI-CATHODE RECEIVED ELECTRON BEAM MELTING TO FORM A SUPERHARD NANOCOMPOSITE COATINGS

**V.M. Beresnev, P.V. Turbin, V.V. Grudnitskii, I.N. Toryanik, A.Ye. Dmitrenko,  
A.Yu. Kropotov, V.I. Gritsenko, L.V. Malikov, S.S. Grankin**

Methods for obtaining and results of the application of multi-component cathodes produced electron-beam melting to form a super-hard coatings on the basis of Zr, Ti, Si and N and Ti, Hf, Si and N means of vacuum arc deposition. Investigated compliance with the elemental composition of the synthesized coating composition of the sputtering cathode.

**Keywords:** vacuum arc deposition method, a cathode nanocomposite coating, electron-beam melting.

### ВВЕДЕНИЕ

Электронно-лучевое плавление (ЭЛП) [1] характеризуется способностью к очистке и позволяет в значительных пределах изменять параметры источника нагрева. Данная технология успешно применяется для переплавки и очистки металлов и сплавов в условиях высокого вакуума с применением медных форм, охлаждаемых водой. В настоящее время процесс ЭЛП широко применяется для

производства тугоплавких и химически активных металлов, таких как тантал, ниобий, молибден, вольфрам, ванадий, гафний, цирконий, титан, а также их сплавов. ЭЛП играет важную роль в производстве сверхчистых материалов для катодов и сплавов, используемых в электронике, при переработке титанового лома, для изготовления распыляемых катодов, из которых синтезируются защитные покрытия на основе тугоплавких металлов.

Электронный луч в процессе ЭЛП формируется электронно-лучевой пушкой. Электронно-лучевые пушки являются высокотемпературными источниками нагрева, при помощи которых в точке фокусировки луча можно получить температуру плавления и даже испарения любого материала. Применение магнитной фокусировки и быстрое сканирование с высокой частотой электронного луча позволяет эффективно направлять тепловое воздействие на объекты различной формы и является наиболее гибким источником нагрева в технологиях переплава. Электронный луч создает на объекте обычной плотности удельную энергию в 100 кВт/см<sup>2</sup>. В зависимости от материала выход по передаче мощности составляет от 50 до 80 %. Поскольку при электронно-лучевой плавке нагревается только поверхность, образуется только мелкий слой расплавленного металла при допустимых скоростях плавки, что положительно влияет на структуру слитка относительно пористости, ликваций и прочего. Так как расплавленный металл находится в вакууме, уровня от 1 до 0,001 Па происходит высокая дегазация расплавленного материала. Металлические и неметаллические включения с давлением испарения выше, чем у основного материала избирательно испаряются, что позволяет получить слиток желаемой степени чистоты. В других случаях это может привести к потере желаемых легирующих элементов, количество которых должно рассчитываться.

В данной работе метод электронно-лучевой плавки используется для изготовления экспериментальных катодов формирования вакуумно-дуговым способом многокомпонентных защитных покрытий на основе нитридов тугоплавких металлов. Исследуется корреляция элементного состава формируемых покрытий и распыляемых катодов.

## МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В РАБОТЕ

Для получения многокомпонентного экспериментального материала использовался метод ЭЛП [3]. Процесс электронно-лучевого переплава заключается в расплавлении исходных компонентов в вакууме и получение материала в виде слитка. Тройные сплавы

Zr+Ti+Si, Ti+Hf+Si выплавлялись методом многократного переплава для получения равномерного перемешивания компонентов на установке “УПМ-1”. В процессе переплава происходила очистка от углерода и кислорода и летучих металлических примесей. Такой способ получения сплава нами был использован для исключения попадания нежелательных примесей на стадии получения сплава. Схема установки для получения многокомпонентных сплавов методом ЭЛП представлена на рис. 1.

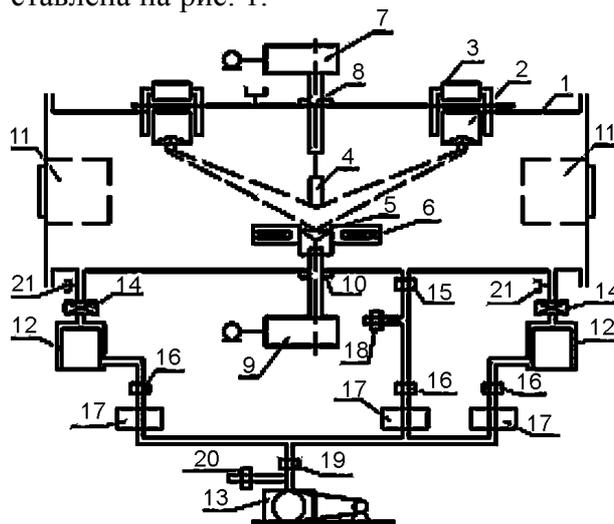


Рис. 1. Схема установки ЭЛП металлов: 1 – корпус установки; 2 – электронно-лучевая пушка; 3 – магнитная отклоняющая система; 4 – переплавляемый электрод; 5 – слиток; 6 – кристаллизатор; 7, 8 – механизм подачи электрода; 9, 10 – механизм вытягивания слитка; 11 – геттеро-ионный насос; 12 – диффузионный насос; 13 – форвакуумный насос; 14 – 20 – вакуумные затворы; 21 – манометрические датчики.

Установка электронно-лучевой плавки металлов “УПМ-1” предназначена для ЭЛП в вакууме ( $10^{-4} \div 10^{-6}$  Па) тугоплавких, редких и рассеянных металлов: ниобия, циркония, ванадия, тантала и др., а также получения сплавов на основе этих металлов. Установка изготовлена из нержавеющей стали и собрана на металлических уплотнениях. Это позволяет прогревать стенки камеры и ее внутренние части с целью удаления нежелательных газов. Данная установка имеет шесть электронно-лучевых пушек, расположенных на кольцеобразной станине, мощность электронно-лучевых пушек 60 кВт, диаметр кристаллизатора 45 мм. Система предварительной откачки состоит из двух паромасляных насосов с азот-

ными ловушками производительностью  $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$  и предназначена для откачки установки во время прогрева.

При плавке откачка осуществлялась двумя геттеро-ионными насосами ГИН-5 со скоростью откачки  $5,0 \text{ м}^3/\text{с}$  каждый, для улучшения вакуумных условий во время плавки, один из насосов был заменен титановым сублимационным насосом. Предельный вакуум установки составляет  $10^{-8} \text{ Па}$ , в процессе плавки в камере поддерживался вакуум в пределах  $10^{-2} \div 10^{-3} \text{ Па}$ . В момент фокусировки энергия волны сжимает и нагревает газ по оси разрядной камеры, в результате чего происходит диссоциация молекулярного газа. Более того, во время этого процесса, также происходит принудительное разрушение токового канала искрового разряда. После диссоциации молекулярного газа атомарный газ, вылетая из разрядной трубки, адиабатически расширяется в технологическом объеме без рекомбинации.

Цельнометаллический материал в виде слитков  $\text{Zr}+\text{Ti}+\text{Si}$ ,  $\text{Ti}+\text{Hf}+\text{Si}$  получали в дуговой вакуумной печи для выплавки в медном охлаждаемом кристаллизаторе (рис. 2).

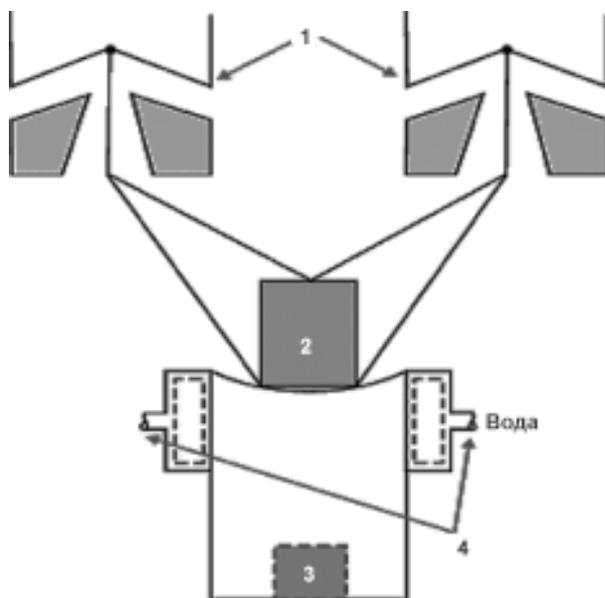


Рис. 2. Схема вакуумной дуговой печи с кристаллизатором: 1 – электронная пушка; 2 – образец; 3 – поддон; 4 – охлаждаемый кристаллизатор.

Физической основой процесса электронно-лучевой плавки является превращение кинетической энергии электронов, разогнанных в электрическом поле до скоростей  $104 \div 105 \text{ м/с}$ , в тепловую при их торможении в

поверхностном слое металла. Устройство, формирующее поток ускоренных электронов (электронный луч), называется электронно-лучевой пушкой.

Источником свободных электронов в пушке является термокатод. Им могут быть нагретые до высокой температуры проволока, стержень или таблетка из материала с низкой работой выхода электронов, например, вольфрам. Эмитированные электроны ускоряются в электрическом поле, создаваемом между катодом и анодом (разность потенциалов поддерживают равной  $20 \div 45 \text{ кВ}$ ), далее через отверстие в аноде сформированный пучок электронов подается в лучевод, где электромагнитные линзы обеспечивают фокусировку электронного луча и его отклонение в заданном направлении. Так как при столкновении с атомами и молекулами газовой среды электроны теряют свою энергию и рассеиваются, то внутреннее пространство электронной пушки откачивают вакуумными насосами до давления  $10^{-2} \div 10^{-3} \text{ Па}$ , а камеры плавки – до давления  $10^{-1} \div 10^{-2} \text{ Па}$ .

Плавка проводилась классическим капельным методом по схеме: нагрев → оплавление → плавка → кристаллизация. Плавка осуществлялась на медный охлаждаемый водой поддон, образцы получались в виде цилиндрических слитков весом около  $100 \text{ г}$ .

Элементный состав образцов до и после ЭЛП определялся с помощью энерго-массанализатора ЭМАЛ-2 [2]. Предельная чувствительность этого метода анализа по металлическим примесям  $\sim 10^{-5} - 10^{-6} \text{ ат. \%}$ .

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Покрyтия на основе  $\text{Ti}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Si}$  и  $\text{N}$  и  $\text{Ti}$ ,  $\text{Hf}$ ,  $\text{Si}$  и  $\text{N}$  формировались методом вакуумно-дугового осаждения с применением импульсной ВЧ стимуляции на полированные поверхности образцов из стали 45 диаметром  $10 \text{ мм}$  и толщиной  $3 \text{ мм}$ . В среде молекулярного азота распылялись цельнолитые катоды  $\text{Zr}+\text{Ti}+\text{Si}$ ,  $\text{Ti}+\text{Hf}+\text{Si}$  прямоточным пучком и с применением магнитной сепарации. Толщина покрытий получалась в пределах  $1,5 - 3 \text{ мкм}$  [4, 5].

Потенциал смещения подавался на подложку от ВЧ генератора импульсами затухающих колебаний с частотой < 1 МГц, длительностью каждого импульса ~60 миллисекунд, с частотой повторений импульсов ~10 КГц. Величина отрицательного автосмещения потенциала на подложке, благодаря ВЧ диодному эффекту, составляла 2 кВ в начале импульса и снижалась на конечном участке импульса до 100 В.

Методом вакуумно-дуговой переплавки изготовливались материалы с разным элементным составом для двух типов катодов. Первый тип катода содержал: Zr – 78 ат.%; Ti – 10 ат.%; Si – 12 ат.%; второй тип катода состоял из: Zr – 65 ат.%; Ti – 25 ат.%; Si – 10 ат.%. Покрытия первой и второй серий формировались прямоструйным способом из двух типов катодов соответственно, третья серия покрытий формировалась из катода второго типа с применением сепарации ионно-плазменного потока. Влияние физических параметров осаждения на элементный состав и морфологию поверхности покрытий осуществлялся путем варьирования давления рабочего газа  $P$  и потенциала смещения  $U_{См}^{ВЧ}$  (энергии частиц).

Данные энергодисперсионного анализа первой экспериментальной серии синтезированных покрытий на основе Ti, Zr, Si и N, приведенные в табл. 1, и результирующие средние значения элементного микроанализа покрытия показывают хорошее соответствие состава материала покрытия составу распяленного катода по тяжелым элементам (без учета составляющей атомов азота): 2,1 ÷ 2,7 ат.%

Таблица 1  
Результаты энергодисперсионного анализа покрытия на основе Zr, Ti, Si и N (первый тип)

Условия формирования покрытий	Состав катода и покрытия, ат.%				
	Zr	Ti	Si	N	Fe
Катод	78,0	12,0	10,0	–	–
$P = 0,3$ Па, $U_{См}^{ВЧ} = -200$ В	60,5	5,4	4,6	24,8	3,8
$P = 0,3$ Па, $U_{См}^{ВЧ} = -100$ В	61,9	5,3	4,2	24,8	3,8
$P = 0,7$ Па, $U_{См}^{ВЧ} = -200$ В	62,2	5,1	3,8	25,1	3,8

кремния, 3,5 – 5,2 ат.% титана и 93,5 ÷ 95 ат.% циркония.

Особенностью второй серии образцов является повышение содержания сильного нитридообразующего элемента – титана (табл. 2). По данным энергодисперсионного анализа его содержание в осажденных покрытиях также достаточно велико, а влияние потенциала смещения на селективное распыление титановых атомов проявляется в меньшей степени по сравнению с покрытиями, полученными в первой серии (табл. 1).

Таблица 2  
Результаты энергодисперсионного анализа покрытия на основе Zr, Ti, Si и N (второй тип)

Условия формирования покрытий	Состав катода и покрытия, ат.%				
	Zr	Ti	Si	N	Fe
Катод	65,0	25,0	10,0	–	–
$P = 0,3$ Па, $U_{См}^{ВЧ} = -200$ В	42,7	22,1	2,6	29,0	3,6
$P = 0,3$ Па, $U_{См}^{ВЧ} = -100$ В	40,0	23,3	2,1	31,0	3,6
$P = 0,7$ Па, $U_{См}^{ВЧ} = -200$ В	41,0	21,6	1,9	32,0	3,5

При этом если из полученных массовых процентов оценить концентрацию атомов титана в покрытии, то по сравнению с первой серией содержание в покрытии титановых атомов изменилось от ~5 ат.% до ~50 ат.% (при условии, что учитываются только металлические атомы в покрытии).

Данные результатов элементного микроанализа покрытия также показывают относительное снижение содержания кремниевых атомов в покрытии при большем  $U_{См}^{ВЧ} = -200$  В по сравнению с  $U_{См}^{ВЧ} = -100$  В и увеличение при этом доли атомов азота в покрытии. В среднем для  $P = 0,3$  Па и  $U_{См}^{ВЧ} = -100$  В в покрытии содержится 35 ÷ 39 ат.% азота, 2,2 ÷ 2,4 ат.% кремния 29 ÷ 31 ат.% титана и 32 ÷ 34 ат.% циркония. При увеличении  $U_{См}^{ВЧ}$  до –200 В среднее содержание элементов в покрытии меняется следующим образом: 37 ÷ 41 ат.% N, 1,9 ÷ 2,2 ат.% Si, 27 ÷ 30 ат.% Ti, 34 ÷ 37 ат.% Zr.

Таким образом, увеличение по модулю  $U_{См}^{ВЧ}$  от –100 В до –200 В приводит к более эффективному захвату атомов азота в приповерхностной области формируемого покры-

тия и более интенсивной их ионизации, что стимулирует, при этом, интенсивное протекание химической реакции образования нитрида. При этом в результате баллистического распыления легких атомов кремния и, в значительно меньшей степени – титана, происходит обеднение данными элементами растущего покрытия при увеличении по модулю  $U_{Cm}^{ВЧ}$ .

Приведенные выше результаты свидетельствуют, что в случае невысокой теплопроводности распыляемых материалов, свойственной как титану, так и цирконию  $\lambda_{400}(Ti) = 20 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ,  $\lambda_{400}(Zr) = 22 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  [7] усиливается генерация макрочастиц, что приводит к высокой плотности в покрытиях капельной фракции.

Увеличение давления газа приводит к тому, что количество и размер макрочастиц уменьшается, особенно существенно при наличии в вакуумной камере активных газов, образующих с испаряемым материалом тугоплавкие соединения.

Применение сепарированного плазменного потока позволяет осветить вопрос разделения элементов в покрытии (см. табл. 3) в зависимости от парциального давления азота.

Как свидетельствуют данные энергодисперсионного анализа (табл. 3) отличительной особенностью этой серии образцов является значительное уменьшение относительного содержания в покрытиях легких элементов и, в особенности, кремниевой составляющей.

Таблица 3

Результаты энергодисперсионного анализа покрытия на основе Zr, Ti, Si и N (третья серия с применением сепарации ионно-плазменного потока)

Условия формирования покрытий	Состав катода и покрытия, ат.%				
	Zr	Ti	Si	N	Fe
Катод	65,0	25,0	10,0	–	–
$P = 0,8 \text{ Па}$ , $U_{Cm}^{ВЧ} = -150 \text{ В}$	59,9	17,8	1,3	17,5	3,5
$P = 0,1 \text{ Па}$ , $U_{Cm}^{ВЧ} = -150 \text{ В}$	57,8	19,7	1,2	17,9	3,4

В табл. 4 приведен (в пересчете для тяжелых атомов, составляющих конденсат) элементный состав рассматриваемого покрытия,

полученный с использованием методов энергодисперсионной спектроскопии и рентгенофлуоресцентного элементного анализа.

Таблица 4

Элементный состав исследуемого конденсата

Метод исследования	Si, ат.%	Ti, ат.%	Zr, ат.%
Энергодисперсионная спектроскопия	3,5	6,5	90
Рентгенофлуоресцентный элементный анализ	2,5	3,0	94,5

Как видно из табл. 4, данные об элементном составе, полученные с помощью энергодисперсионной спектроскопии достаточно хорошо согласуются с результатами рентгенофлуоресцентного элементного анализа покрытий, и демонстрируют очень близкие значения состава материала второй серии образцов. По сравнению с распыляемой мишенью наибольшее относительное обеднение в пересчете по тяжелым атомам присуще атомам кремния и титана.

Таким образом, используемые режимы получения покрытий приводят к существенному обеднению конденсата относительно легкими элементами катода: кремнием и титаном. Причем, преимущественно обедняется конденсат наиболее легкими атомами кремния.

Для образцов второй серии относительное обеднение кремневыми атомами происходит еще более значительно, приводя к среднему составу  $1,5 \div 1,7 \text{ ат.}\%$  кремния,  $7,5 \div 8,8 \text{ ат.}\%$  титана,  $89,5 \div 91 \text{ ат.}\%$  циркониевых атомов. Также повышается и среднее значение попадающих из распыляющей атмосферы атомов азота, содержание которых в конденсате становится близким к стехиометрическому  $XN$  (где  $X = Zr+Si+Ti$ ) составу. По-видимому, с более эффективным взаимодействием титановых атомов с азотными атомами, в приповерхностной области, можно связать увеличение содержания титановых атомов по сравнению с кремневыми в конденсатах второй серии, осаждаемых при более высоком давлении  $N_2$  атмосферы.

Сравнивая элементный состав конденсатов покрытий второй и третьей серий можно увидеть, что у образцов второй серии коли-

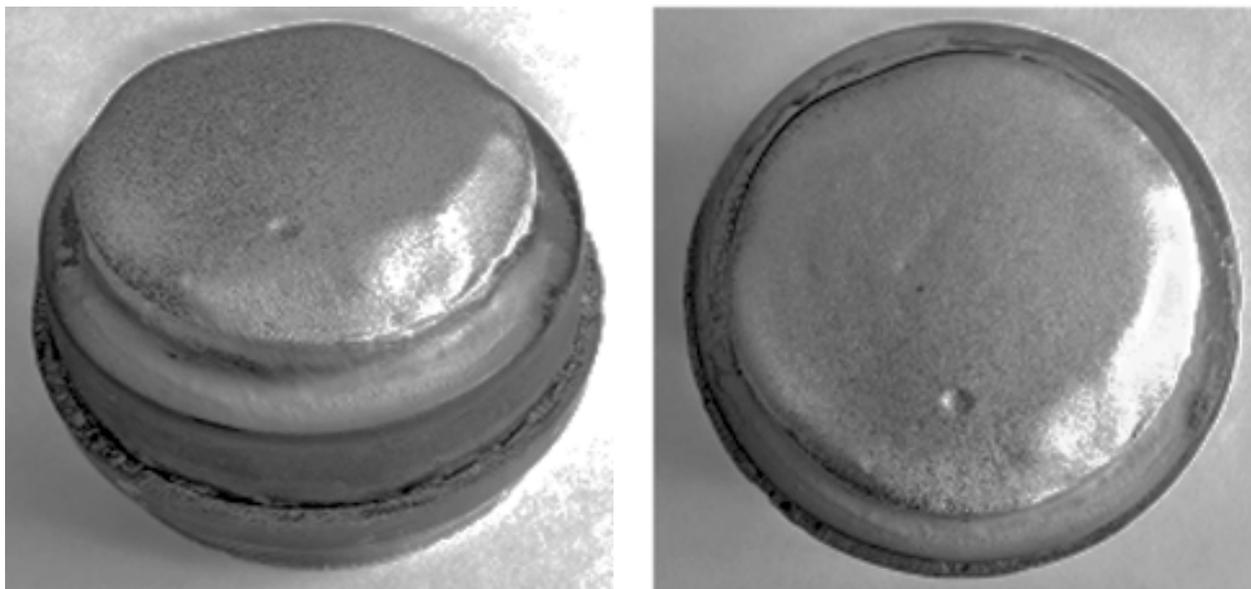


Рис. 3. Снимок многокомпонентного катода Ti+Hf+Si после распыления.

чество атомов кремния и титана практически совпадают. Для образцов третьей серии, полученных при более высоком давлении  $N_2$  атмосферы, характерно существенное увеличение доли атомов титана и некоторое уменьшение доли атомов кремния. При этом содержание атомов циркония для образцов обеих серий осталось практически неизменным.

Увеличение содержания атомов титана в конденсатах третьей серии объясняется повышением эффективности взаимодействия атомов титана с азотом в приповерхностной области.

С целью определения обобщающих характеристик покрытий на основе нитридов тугоплавких металлов, поиска покрытий с более совершенными физико-механическими и термическими показателями исследовались покрытия на основе твердого раствора нитридов титана и гафния.

Покрытия на основе Ti, Hf, Si и N формировались из цельнолитых катодов Ti+Hf+Si, полученных методом ЭЛП. Ниже приведены результаты исследований элементного состава покрытий на основе Ti, Hf, Si и N, полученных путем распыления катода Ti (58 ат.%), Hf (12 ат.%) и Si (30 ат.%) в зависимости от основных физико-технологических параметров осаждения (энергии осажденных частиц и давления рабочего газа).

На рис. 3 приведены снимки катода Ti + Hf + Si после распыления. Наблюдается не-

равномерность расходования материала, что объясняется недостаточной степенью однородности катода по причине слабого перемешивания в процессе формирования катода методом ЭЛП.

Анализ элементного состава покрытия на основе Ti, Hf, Si и N свидетельствует об отсутствии кислорода. При этом количество азота в покрытии составляет 43,0 ат.%, титана 35,55 ат.%, кремния 8,0 ат.%, гафния 9,0 ат.%. Присутствие железа составляет 4,45 ат.% и объясняется диффузией от стальной подложки.

Для образцов с покрытием на основе Ti, Hf, Si и N ( $P = 0,3$  Па,  $U_{См}^{ВЧ} = 100$  В) получена первая серия со следующей стехиометрией покрытия Ti – 40 ат.%; Hf – 9,0 ат.%; Si – 8,0 ат.%; N – 43 ат.% при толщине пленки  $(1 \pm 0,012)$  мкм.

Увеличивая импульсный потенциал смещения до 200 В при повышении давления азота в камере до 0,7 Па, была получена вторая серия образцов с покрытием на основе Ti, Hf, Si и N (Ti – 28 ат.%; Hf – 18,0 ат.%; Si – 9,0 ат.%; N – 45 ат.%).

Приведенный экспериментальный результат объясняется увеличением давления рабочего газа (азота), что вызывает плавное снижение концентрации кремния, обусловленное с одной стороны [5] тем, что средняя кинетическая энергия вылетающих из катода

ионов титана (122 эВ) выше, чем у ионов кремния (97 эВ). Таким образом, в результате столкновений с газовой мишенью, происходит “обеднение” плазменного потока менее энергичными частицами. С другой стороны, этому процессу также способствует селективное распыление кремния налетающим потоком частиц [6]. При дальнейшем увеличении давления азота происходит значительное повышение содержания Si в покрытии. Повышение величины потенциала смещения на подложке, влияет на энергию конденсируемых частиц и на концентрацию кремния.

Таким образом, изменяя физико-технологические параметры осаждения (импульсный ВЧ потенциал смещения, парциальное давление азота) можно изменять процентное содержание компонентов покрытий.

## ВЫВОДЫ

Получены результаты зависимости элементного состава сверхтвердых нанокompозитных защитных покрытий от физико-технологических параметров вакуумно-дугового осаждения с импульсной ВЧ стимуляцией.

Обобщающей закономерностью является значительное баллистическое распыление легких элементов в процессе осаждения, что определяет обеднение покрытия указанными формирующими элементами.

Регулирование давления реакционного газа позволяет контролировать концентрацию легких элементов в составе синтезированного покрытия.

Результаты экспериментов указывают на существенное соответствие элементного состава формируемого покрытия и распыляемого катода.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность профессору Сумского государственного университета А.Д. Погребняку и профессору Национального технического университета “Харьковский политехнический институт” О.В. Соболю за участие в обсуждении результатов и поддержку работы.

Работа частично выполнена по темам НИР 0112U006974 и 0113U001079, финансируемых

Министерством образования и науки Украины.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патон Б., Тригуб Н., Козлитин Д. Электронно-лучевая плавка. – К.: Наукова думка, 1997. – 264 с.
2. Быковский Ю.А., Неволин В.Н. Лазерная масс-спектрокопия. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.
3. Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриненко С.Д., Пилипенко Н.Н., Болков А.Ф., Лахов А.М., Линдт К.А., Мухачев А.Л., Попов В.И. Электронно-лучевая плавка титана, циркония и гафния//ВАНТ, Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2002. – № 6 (82). – С. 95-99.
4. Погребняк А.Д., Шпак А.П., Береснев В.М., Стехиометрия, фазовый состав и свойства сверхтвердых наноструктурных пленок Ti-Hf-Si-N, полученных с помощью вакуумно-дугового источника в высокочастотном разряде//ПЖТФ. – 2011. – Т. 37, № 13. – С. 91-97.
5. Yushkov G., Anders A., Oks E.M., Brown I.G. Ion velocities in vacuum arc plasmas//J. of Appl. Phys. – 2000. – Vol. 88, No. 10. – P. 5618-5622.
6. Береснев В.М., Погребняк А.Д., Соболев О.В., Грудницкий В.В., Маликов Л.В. Получение методом вакуумно-дугового осаждения и исследование структурно-фазового состояния пленок (Ti-Hf-Si)N//Матер. 4-ой Междунар. науч. конф. “Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур, ФММН’2010”. (Харьков, Украина). – 2010. – С. 500-502.
7. Ho C.Y., Powel R.W., Liley P.E. Thermal Conductivity of the Elements//J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1972. – Vol. 1, No. 2. – P. 279-421.

## LITERATURA

1. Paton B.E., Trigub N.P., Kozliti D.A. ‘Elektronno-luchevaya plavka. – K.: Naukova dumka, 1997. – 264 s.
2. Bykovskij Yu.A., Nevolin V.N. Lazernaya mass-spektroskopiya. – M.: ‘Energoatomizdat, 1985. – 128 s.
3. Azhazha V.M., V’yugov P.N., Lavrinenko S.D., Pilipenko N.N., Bolkov A.F., Lahov A.M., Lindt K.A., Muhachev A.L., Popov V.I. ‘Elektronno-luchevaya plavka titana, cirkoniya i gafniya//VANT, Seriya: Fizika radiacionnyh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie. – 2002. – № 6 (82). – S. 95-99.

4. Pogrebnyak A.D., Shpak A.P., Beresnev V.M., Stehiometriya, fazovyy sostav i svoystva sverhtverdyh nanostrukturnykh plenok Ti-Hf-Si-N, poluchennykh s pomosh'yu vakuumno-dugovogo istochnika v vysokochastotnom razryade//PZhTF. – 2011. – T. 37, № 13. – S. 91-97.
5. Yushkov G., Anders A., Oks E.M., Brown I.G. Ion velocities in vacuum arc plasmas//J. of Appl. Phys. – 2000. – Vol. 88, No. 10. – P. 5618-5622.
6. Beresnev V.M., Pogrebnyak A.D., Sobol' O.V., Grudnickij V.V., Malikov L.V. Poluchenie metodom vakuumno-dugovogo osazhdeniya i issledovanie strukturno-fazovogo sostoyaniya plenok (Ti-Hf-Si)N//Mater. 4-oj Mezhdunar. nauch. konf. "Fiziko-himicheskie osnovy formirovaniya i modifikacii mikro- i nanostruktur, FMMN'2010". (Har'kov, Ukraina). – 2010. – S. 500-502.
7. Ho C.Y., Powel R.W., Liley P.E. Thermal Conductivity of the Elements//J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1972. – Vol. 1, No. 2. – P. 279-421.