

УДК 621.9.048

# СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВС-ПРЕССОВАННЫХ КАТОДОВ СИСТЕМЫ Ti-C-Al-Si И ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ НИХ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2013 г. **А. Ф. Федотов, А. П. Амосов, А. А. Ермошкин,  
В. Н. Лавро, С. И. Алтухов, Е. И. Латухин, Д. М. Давыдов**

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)

**А. Ф. Федотов** – докт. техн. наук, профессор кафедры механики СамГТУ (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244). E-mail: a.fedotov50@mail.ru.

**А. П. Амосов** – докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов СамГТУ. E-mail: mvm@samgtu.ru.

**А. А. Ермошкин** – ассистент той же кафедры. E-mail: ermandr@ya.ru.

**В. Н. Лавро** – доцент той же кафедры. E-mail: lavro7@mail.ru.

**С. И. Алтухов** – аспирант той же кафедры. E-mail: altuhov\_serg@mail.ru.

**Е. И. Латухин** – канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: evgelat@yandex.ru.

**Д. М. Давыдов** – аспирант той же кафедры. E-mail: davidovd77@mail.ru.

Выполнены исследования фазового состава, структуры и свойств СВС-прессованных материалов системы Ti-C-Al-Si. Показано, что металлоподобные соединения титана могут быть использованы в качестве катодов вакуумно-дуговых испарителей. Покрытия, полученные из СВС-катодов, являются однофазными и представляют собой кубический нитрид титана состава (Ti, Al, Si)N. Объем микрокапельной фазы у них в 2,5–3,0 раза меньше по сравнению с TiN, а их микроструктура не фрагментирована на малопрочные столбчатые элементы; размер ОКР в 2 раза меньше, чем у нитрида титана. При примерно одинаковой твердости покрытия (Ti, Al, Si)N за счет более низкого модуля упругости существенно превосходят покрытия из TiN по стойкости к упругой деформации разрушения и сопротивлению пластической деформации. При фрезеровании вольфрамомедного сплава стойкость твердосплавных фрез с покрытием (Ti, Al, Si)N в 2,4 раза больше, чем с покрытием TiN, полученным из титанового катода с магнитной сепарацией плазменного потока.

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, СВС-катоды, вакуумно-дуговые покрытия.

The phase composition, structure and properties of SHS-compacted materials of the Ti-C-Al-Si system have been investigated. It is shown that metal-like titanium compounds can be used as cathodes of vacuum-arc evaporators. The coatings obtained from SHS-cathodes are of single-phase and represent cubic titanium nitride of the (Ti, Al, Si) N composition. Their microdrop phase volume is 2,5-3,0 times lesser compared with TiN, and their microstructure is not fragmented into low-strength columnar elements; the body-centered cubic lattice size is two times lesser than that of titanium nitride. Approximately given equal hardness and at the cost of lower elastic modulus, (Ti, Al, Si) N coatings essentially exceed TiN coatings in durability to elastic failure strain and plastic resistance. When milling tungsten-copper alloy, the lifetime of (Ti, Al, Si)N coated carbide cutters is 2,4 times more than that of cutters with TiN coating produced from titanium cathode with magnetic separation of plasma flow.

**Key words:** self-propagating high-temperature synthesis, SHS-cathodes, vacuum-arc coatings.

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективным способом повышения ресурса режущего инструмента является нанесение ионно-плазменных покрытий. Наибольшее распространение получили вакуумно-дуговые покрытия на основе TiN. Однако покрытия из одноэлементного нитрида титана практически исчерпали свой потенциал, и в последнее время интенсивно развиваются исследования по получению многокомпонентных и композиционных покрытий. Существенное повышение физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий достигается при введении в нитрид титана алюминия и/или кремния [1]. Соответствен-

но, востребованными становятся алюминий- и кремнийсодержащие катодные материалы.

Многокомпонентные покрытия могут быть получены двумя способами: испарением одно- временно отдельных однокомпонентных катодов или одного многокомпонентного. В первом случае необходимый элементный состав плазменного потока достигается сложным и трудоемким подбором технологических режимов испарения каждого из катодов. При этом не всегда удается обеспечить равномерное перемешивание потоков, генерируемых разными катодами. Второй способ генерации многокомпонентной плазмы позволяет существенно упростить конструкцию оборудования для

нанесения покрытий, повысить надежность его работы и однородность генерируемой плазмы.

В настоящее время используются многокомпонентные катоды трех типов: сплавные, составные и катоды, полученные порошковыми технологиями. В последнее время интерес исследователей вызывает изготовление многокомпонентных катодов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Проведение в одной установке сначала СВС, а затем силового уплотнения горячих продуктов синтеза (технология СВС-прессования) позволяет в одну стадию получать высокоплотные заготовки из материалов на основе тугоплавких соединений.

Цель настоящей работы – исследование состава, структуры и свойств многокомпонентных СВС-прессованных катодов системы Ti–C–Al–Si и полученных из них вакуумно-дуговых покрытий.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По специально разработанной технологии СВС-прессования [2] получали 4-слойную заготовку-полуфабрикат, состоящую из водоохлаждаемого основания из нержавеющей стали и трех слоев продуктов СВС:

- испаряемый рабочий;
- промежуточный;
- СВС-припой.

СВС-прессование осуществляли в цилиндрической пресс-форме-реакторе диаметром 125 мм на гидравлическом прессе модели Д-1932 при давлении прессования 125 МПа. При составлении экзотермических шихт рабочего слоя использовали порошки следующих марок: титан ПТС, алюминий ПА-4, кремний КР-0 и углерод технический П804Т. Экзотермическую шихту массой 0,2 кг готовили в шаровой мельнице объемом 1 л при соотношении масс шаров и шихты 3 : 1. Время смешивания составляло 4 ч. Из шихтовых смесей односторонним прессованием в цилиндрической матрице получали трехслойные шихтовые заготовки диаметром 54 мм с относительной плотностью 0,6–0,65. Температуру горения определяли термпарным способом с использованием вольфрамиевых термопар ВР5/ВР20 диаметром 0,2 мм в лабораторном СВС-реакторе диаметром 30 мм.

Вакуумно-дуговые покрытия получали с помощью установки «Юнион» и наносили на цилиндрические образцы из стали Р6М5 диаметром 15 мм и высотой 5 мм, термообработанной до твердости  $HRC = 64 \div 65$ . Плоскую поверхность образцов подвергали шлифованию и полированию до  $R_a = 2$  мкм. Образцы располагали плоской поверхностью фронтально относительно плазменного потока с дистанцией напыления 285 мм.

Металлографический анализ осуществляли на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Jeol JSM-6390A. Элементный состав СВС-материалов и покрытий оценивали методом микрорентгено-спектрального анализа (МРСА) на РЭМ Jeol JSM-6390A с приставкой Jeol JED-2200. Микроструктурные исследования покрытий при анализе характеристик микрокапельной фазы выполняли также на РЭМ Jeol JSM-6390A. На нем же определяли их толщину на поперечном изломе.

Твердость образцов покрытий исследовали на нанотвердомере Agilent Technologies G200 Nano Indenter. Твердость и модуль упругости оценивали по методике Оливера – Фарра с использованием пирамиды Берковича. Фазовый состав продуктов СВС и вакуумно-дуговых покрытий определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) с использованием автоматизированного дифрактометра ARL X'tra («Thermo Scientific»). Пористость материала рабочего слоя СВС-катодов находили металлографическим методом.

## СОСТАВ, СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СВС-КАТОДОВ

Имеющиеся в литературе сведения о закономерностях фазообразования при СВС в системе Ti–C–Al–Si немногочисленны. В работе [3] выполнено исследование фазового состава и свойств СВС-материалов, полученных в системе Ti–Al–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–C. Здесь кремний вводился в исходную шихту не в виде химического элемента, а в составе нитрида кремния. Основной фазой продуктов синтеза является карбонитрид титана (TiC<sub>x</sub>N<sub>y</sub>), также присутствуют его алюминид (Al<sub>3</sub>Ti) и силицид (Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>).

Изучение процесса фазообразования при СВС в системе Ti–C–Al–Si, составленной из химиче-

ских элементов, выполнено в работе [4]. Рентгенофазовый анализ пористых материалов показал, что продукты синтеза являются многофазными и в зависимости от состава образуются следующие фазы:  $Ti_5Si_3$ ,  $Ti_3Al$ ,  $TiAl$ ,  $Ti_5(Si,Al)_3$ ,  $Ti_3SiC_2$ ,  $Ti_3AlC_2$ ,  $TiC$  и  $Ti_5Si_{3-x}Al_xC_y$ .

Для получения в СВС-системе  $Ti-C-Al$  материала, не содержащего свободного алюминия и состоящего только из фаз с высокой температурой плавления, содержания титана и углерода должны быть назначены из условия образования нестехиометрического карбида титана [5, 6]. Наиболее исследованы закономерности фазообразования в СВС-системе  $TiC_{0,5}-20\%Al$  с целью получения СВС-методом МАХ-фазы состава  $Ti_2AlC$  [7, 8 и др.]. По аналогии с  $TiC_{0,5}-20\%Al$  в базовую СВС-систему  $TiC_{0,5}$  вводили 20, 25 и 30 % металлического компонента расчетного состава  $Al-10\%Si$  (силумин).

Данные РФА материала рабочего слоя СВС-прессованных катодов системы  $Ti-C-Al-Si$  показали, что полученные продукты синтеза являются многофазными и состоят из МАХ-фазы состава  $Ti_3AlC_2$ , а также  $TiC$ ,  $Al_3Ti$  и  $Ti_5Si_3$  (при 20 и 25 % силумина) или  $TiSi_2$  (при 30 % силумина). Содержание основной фазы  $Ti_3AlC_2$  в зависимости от расчетного состава рабочего слоя составляет 82–84 % (табл. 1). На второй позиции по количеству находится  $TiC$  (9–12 %), затем следуют  $Al_3Ti$  (2,8–7,8 %) и силициды титана (1,0–1,6 %). Причем с ростом расчетной концентрации силумина увеличиваются содержания алюминида и силицидов титана.

Действительный фазовый состав продуктов СВС сильно отличается от расчетного, однако

обозначение многофазного материала с указанием всех фаз и их содержаний является громоздким и неудобным. Поэтому в дальнейшем будем продолжать обозначать материал рабочего слоя через его расчетный состав.

Фотографии микроструктуры рабочего слоя СВС-катодов представлены на рис. 1, на котором четко выделяются 3 структурные составляющие: крупные частицы пластинчатой формы, мелкодисперсные круглые частицы и темная прослойка по границам пластин.

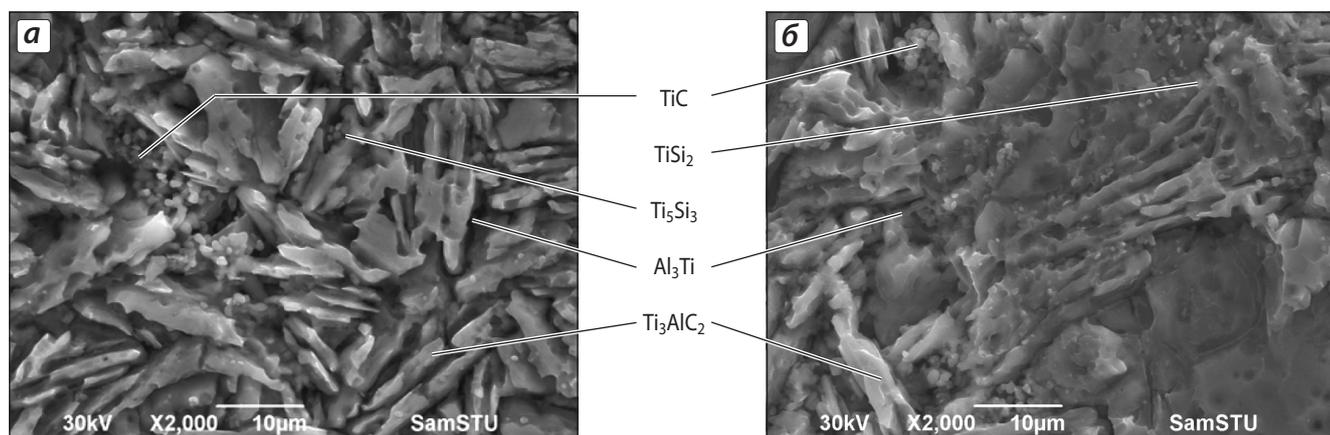
По результатам МРСА и РФА выполнена идентификация элементов микроструктуры. Пластинчатые зерна длиной 8–12 мкм и толщиной 2–4 мкм являются МАХ-фазой состава  $Ti_3AlC_2$ . Мелкодисперсные круглые частицы размером 1–2 мкм представляют собой  $TiC$  и  $Ti_5Si_3$  (см. рис. 1, а) или  $TiSi_2$  (рис. 1, б). Темная прослойка по границам пластин МАХ-фазы является алюминидом титана ( $Al_3Ti$ ).

Металлоподобные тугоплавкие соединения, в том числе на основе титана, представляют сравнительно новый класс катодных материалов. Параметры процесса электродугового испарения в первую очередь зависят от электро- и теплопроводности, а также температур плавления фаз композиционного катода. Интегрально эти физические характеристики определяют основное функциональное свойство катодного материала – минимальный (пороговый) ток дуги, при котором дуговой разряд будет самоподдерживающимся.

В настоящее время отсутствуют адекватные теоретические данные, связывающие физические и функциональные параметры материала катода

**Таблица 1.** Результаты количественного РФА рабочего слоя СВС-катодов

Расчетный состав рабочего слоя катода	Температура горения, °C	Фазовый состав	Содержание фазы, мас.%
$TiC_{0,5}-20\% (Al-10\%Si)$	2016	$Ti_3AlC_2$ $TiC$ $Al_3Ti$ $Ti_5Si_3$	84,2 12,0 2,8 1,0
$TiC_{0,5}-25\% (Al-10\%Si)$	2107	$Ti_3AlC_2$ $TiC$ $Al_3Ti$ $TiSi_2$	83,4 10,2 5,0 1,4
$TiC_{0,5}-30\% (Al-10\%Si)$	2167	$Ti_3AlC_2$ $TiC$ $Al_3Ti$ $TiSi_2$	81,6 9,0 7,8 1,6



**Рис. 1.** Микроструктура материала рабочих слоев СВС-катодов расчетных составов  $TiC_{0,5}-20\% (Al-10\%Si)$  (а) и  $TiC_{0,5}-30\% (Al-10\%Si)$  (б)

и катодные явления в вакуумной дуге. Поэтому функциональные свойства новых катодных материалов устанавливают опытным путем. Так, экспериментально выявлено, что пороговый ток дуги растет с увеличением температуры плавления и коэффициента теплопроводности материала [9].

Физические свойства титана и его соединений, образующихся при СВС в системе Ti–C–Al–Si, представлены в табл. 2. Рассматриваемые соединения титана имеют либо меньшее, либо незначительно большее электросопротивление, чем титан, и могут использоваться в качестве электропроводящих материалов катодов вакуумно-дуговых устройств.

Материал рабочего слоя СВС-прессованных катодов является многофазным. Причем содержание МАХ-фазы состава  $Ti_3AlC_2$  достигает свыше 80 %, и функциональные свойства катода будут определяться в основном ее физическими характеристиками. Для МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  электро- и теплопроводность известны [12], но отсутству-

ют данные о температуре плавления ( $t_{пл}$ ). Приближенно ее можно оценить следующим образом. При одновременном протекании химических реакций и плавления на термограммах горения образуется изотермическая площадка [14], для которой температура горения будет равна величине  $t_{пл}$  одного из компонентов продуктов синтеза. По температуре изотермических площадок получено, что для МАХ-фазы состава  $Ti_3AlC_2$   $t_{пл} \approx 2100 \text{ }^\circ\text{C}$ , что превышает температуру плавления титана, равную  $1660 \text{ }^\circ\text{C}$ . Более высокие значения  $t_{пл}$  и теплопроводности МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  обуславливают и больший ток дуги СВС-катодов –  $100 \div 125 \text{ А}$  против  $80 \text{ А}$  для титанового катода (см. ниже табл. 3).

Устойчивый режим горения электровакуумной дуги и конденсации покрытий реализуется при стабильном давлении вакуума или реакционного газа. Катоды на основе тугоплавких соединений, полученные методами порошковой металлургии, в том числе СВС-прессованием, как

**Таблица 2.** Физические свойства фаз катодных СВС-материалов

Фаза	Удельное электросопротивление, мкОм·м	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Температура плавления, °С	Лит. источник
Ti	0,42	21,9	1660	[10]
Al <sub>3</sub> Ti	0,19	33,5	1340	[11]
Ti <sub>3</sub> AlC <sub>2</sub>	0,366	27,5	2100	[12]
TiSi <sub>2</sub>	0,17	45,9	1500	[13]
Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	0,55	26,8	2130	[13]
TiC	0,61	6,8	3070	[11, 14]

**Таблица 3.** Количество и средний размер микрокапель на поверхности покрытий

Расчетный состав катодов	Ток дуги, А	N, шт.	$d_{cp}$ , мкм	$k_{кф}$ , %
Ti (BT1-00)	80	56	0,74	37,6
TiC <sub>0,5</sub> -20% (Al-10%Si)	125	23	0,87	21,4
TiC <sub>0,5</sub> -25% (Al-10%Si)	110	14	0,89	13,6
TiC <sub>0,5</sub> -30% (Al-10%Si)	100	21	0,88	20,0

правило, содержат поры. При испарении материала катода с большой пористостью они вскрываются, и давление газовой фазы пор приводит к скачкам давления в вакуумной камере и нестабильному горению дуги. В этой связи пористость материала катодов вакуумно-дуговых установок должна быть минимальной. Согласно результатам наших исследований, для рабочего слоя СВС-прессованных катодов она не должна превышать 5 %. При таком уровне пористости дуга горит стабильно и скачков давления в вакуумной камере не наблюдалось.

### СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

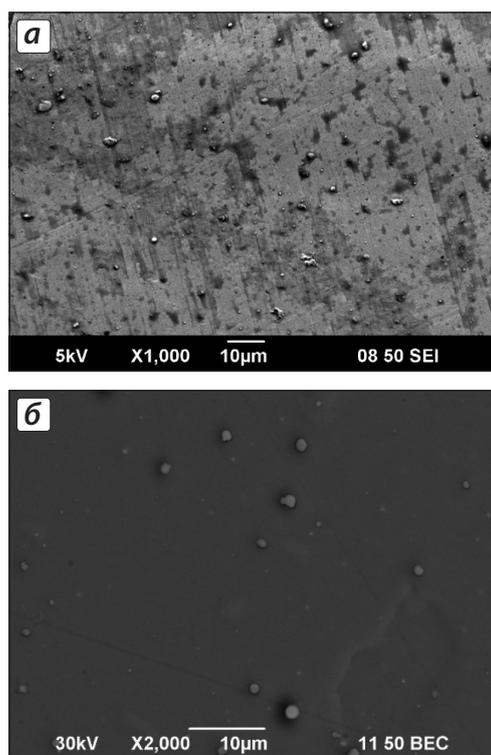
Вакуумно-дуговые покрытия на основе нитрида титана получали на установке «Юнион» при давлении азота 0,15 МПа и времени напыления 20 мин. Свойства покрытий, полученных с использованием СВС-прессованных катодов, сравнивали с одноэлементным покрытием TiN, которое наносили с помощью катода из титана марки BT1-00.

Важнейшей характеристикой вакуумно-дуговых покрытий является наличие микрокапель испаряемого материала, находящихся как на поверхности, так и в объеме покрытия. В дальнейшем рассматривается микрокапельная фаза (МКФ) на поверхности покрытий.

Морфология поверхности покрытий из СВС-катодов системы Ti-C-Al-Si представлена на рис. 2. Микрокапли имеют практически круглую форму. Для количественного анализа МКФ использовали число капель (N), их абсолютный (d) и средний ( $d_{cp}$ ) диаметры, а также относительную площадь ( $k_{кф}$ ), занятую МКФ. Топологические характеристики определяли на 3 произвольно выбранных участках поверхности покрытий размером  $8 \times 8$  мкм.

Результаты измерений и расчета характеристик МКФ представлены в табл. 3. Видно, что средний размер микрокапель в покрытиях, полученных из СВС-катодов, незначительно больше, а их количество в 2,5–4,0 раза меньше. Уменьшение объема микрокапельной фазы в покрытиях системы Ti-C-Al-Si следует связать с высокой температурой плавления МАХ-фазы состава Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>, из которой более чем на 80 % состоят СВС-катоды.

Характерной особенностью покрытий, получаемых ионной бомбардировкой многокомпонентными композициями, является несоответствие составов материалов покрытия и испаряемого катода [15]. Этот эффект связан с самораспылением элементов на растущей поверхности покрытия [16].



**Рис. 2.** Морфология поверхности покрытий из катода BT1-00 (а) и СВС-катода состава TiC<sub>0,5</sub>-20% (Al-10% Si) (б)

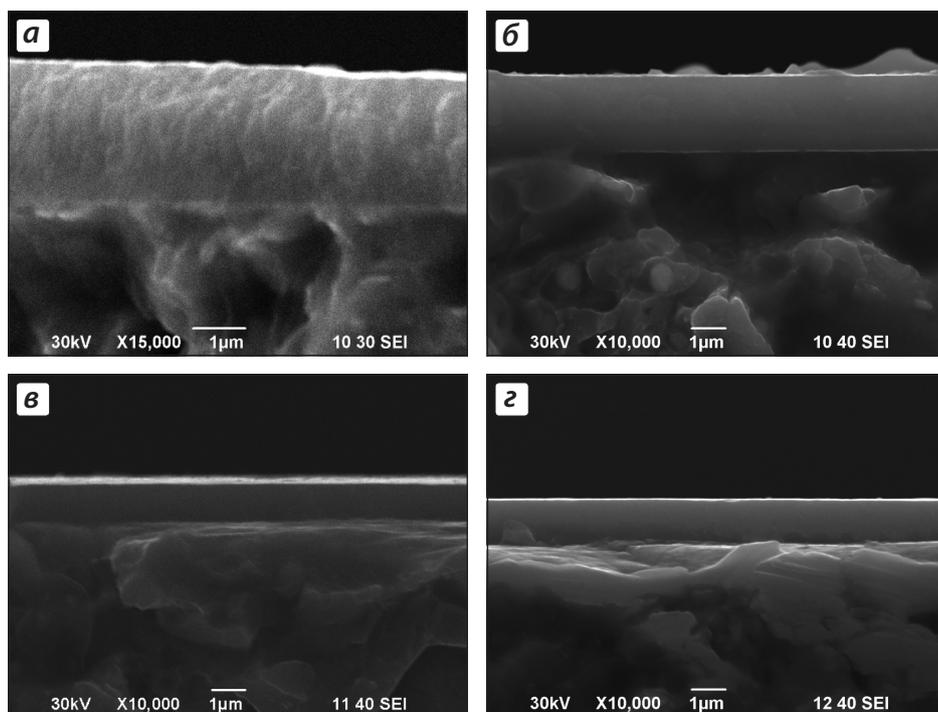
**Таблица 4.** Результаты элементного анализа рабочего слоя СВС-катодов и покрытий

Объект анализа	Содержание, %					$\Delta C_{Al}$ , %	$\Delta C_{Si}$ , %
	Ti	C	N	Al	Si		
Катод $TiC_{0,5}-20\%$ (Al-10%Si)	71,1	8,9	-	18,0	2,0	25	16
Покрытие	56,8	-	28,0	13,5	1,7		
Катод $TiC_{0,5}-25\%$ (Al-10%Si)	66,7	8,3	-	22,5	2,5	36	36
Покрытие	62,4	-	21,7	14,3	1,6		
Катод $TiC_{0,5}-30\%$ (Al-10%Si)	62,2	7,8	-	27	3,0	45	37
Покрытие	61,2	-	22,1	14,8	1,9		

Результаты МРСА химического состава покрытий представлены в табл. 4. Анализ проводили по трем произвольно выбранным областям покрытия. Содержание элементов, обнаруженных в каждой из них, практически одинаковое, величина среднего квадратического отклонения составила 1–2 %. По данным МРСА выявлено, что в покрытии присутствуют все элементы, находящиеся в составе рабочего слоя катода, кроме углерода, отсутствие которого также наблюдалось и при анализе МКФ. По-видимому, метод МРСА не позволяет определить содержание легкого элемента в тонких пленках, и следует использовать дру-

гие способы, такие как спектроскопия тлеющего разряда, оже-спектроскопия и др. Тем не менее результаты МРСА подтвердили закономерность изменения состава покрытий в зависимости от состава многокомпонентного СВС-катода в направлении уменьшения доли легких элементов: алюминия на 25, 36 и 45 %, а кремния на 16, 36 и 37 % (см. табл. 4). При этом с повышением содержания этих элементов в катодном СВС-материале увеличиваются и их потери в покрытии.

Микроструктуру покрытий исследовали на поперечных изломах с помощью растровой электронной микроскопии (рис. 3). Все они облада-



**Рис. 3.** Фрактограммы покрытия TiN (а) и покрытий из СВС-катодов составов  $TiC_{0,5}-20\%$  (Al-10%Si) (б),  $TiC_{0,5}-25\%$  (Al-10%Si) (в) и  $TiC_{0,5}-30\%$  (Al-10%Si) (з)

ют плотной однородной структурой. Покрытие из нитрида титана имеет характерную столбчатую структуру со слабосвязанными границами между кристаллами [17]. Элементы малопрочной столбчатой структуры в покрытиях, полученных из СВС-катодов, отсутствуют.

На поперечных изломах была определена толщина покрытий и затем рассчитана скорость их роста (табл. 5), которая у покрытий из СВС-катодов примерно в 2,0–2,5 раза оказалась меньше по сравнению с покрытием TiN, полученным из титанового катода.

Все покрытия из СВС-катодов являются однофазными и представляют собой кубический нитрид титана состава (Ti, Al, Si)N, и для них характерной является преимущественная ориентация кристаллитов плоскостями (220) и (111) параллельно напыляемой поверхности образца.

По положению дифракционных линий (Ti, Al, Si)N был определен период кристаллической решетки в направлении нормали к поверхности покрытия, а по уширению линии (111) – размер областей когерентного рассеяния (ОКР). С уменьшением размера ОКР увеличивается сопротивление пластической деформации материала, и у покрытий (Ti, Al, Si)N этот показатель почти в 2 раза меньше по сравнению с TiN (см. табл. 5), что должно обеспечивать более высокие механические свойства.

Механические характеристики вакуумно-дуговых покрытий оценивали по величинам твердости ( $H$ ) и модуля упругости ( $E$ ). Рассматривали значения  $H$  и  $E$ , соответствующие интервалу

глубин внедрения  $h = 100 \pm 20$  нм с относительно постоянными свойствами, не выходящему за пределы 10 % толщины покрытия.

Результаты исследований (табл. 6) показали, что наибольшую твердость имеет покрытие, полученное из СВС-катода расчетного состава  $TiC_{0,5}-20\%$  (Al–10%Si), и по уровню значений  $H = 40 \div 42$  ГПа оно является сверхтвердым. У остальных двух покрытий этой системы величина  $H$  сравнительно невысока и меньше твердости покрытия из TiN. Вместе с тем у кремнийсодержащих покрытий параметры, характеризующие стойкость к упругой деформации разрушения и сопротивление пластической деформации, существенно выше, чем у нитрида титана.

Для оценки эксплуатационных свойств покрытий, получаемых из СВС-катодов, в производственных условиях ОАО «Волгабурмаш» были проведены испытания стойкости режущего инструмента. Исследовали стойкость 8-миллиметровых твердосплавных концевых фрез при фрезеровании вольфрамомедного сплава ВМ-15 с твердостью  $HRA = 62$  при следующих условиях: скорость резания 80 м/мин, подача 0,47 мм/об, глубина резания 1,3–1,5 мм.

Испытывали фрезы с покрытием (Ti, Al, Si)N, полученным из СВС-катода расчетного состава  $TiC_{0,5}-20\%$ (Al–10%Si), а также с покрытиями из нитрида титана, которые в ОАО «Волгабурмаш» получают на установке ННВ 6.6 с использованием магнитной сепарации плазменного потока. Оценка износостойкости велась по машинному времени работы фрезы. В среднем стойкость фрез с по-

**Таблица 5.** Толщина, скорость роста и микроструктурные характеристики покрытий

Расчетный состав катода	Толщина покрытия, мкм	Скорость роста, мкм/ч	Период решетки, нм	Размер ОКР, нм
Ti (BT1-00)	2,68	8,04	0,4252	~ 63
$TiC_{0,5}-20\%$ (Al–10%Si)	2,17	4,34	0,4231	~ 30
$TiC_{0,5}-25\%$ (Al–10%Si)	1,22	3,66	0,4235	~ 36
$TiC_{0,5}-30\%$ (Al–10%Si)	1,02	3,06	0,4236	~ 34

**Таблица 6.** Механические свойства покрытий из СВС-катодов

Катод	$H$ , ГПа	$E$ , ГПа	$H/E$	$H^3/E^2$
BT1-00	28–30	540–570	0,052	0,079
$TiC_{0,5}-20\%$ (Al–10%Si)	40–42	440–460	0,091	0,34
$TiC_{0,5}-25\%$ (Al–10%Si)	23–26	275–280	0,088	0,19
$TiC_{0,5}-30\%$ (Al–10%Si)	25–26	295–300	0,086	0,19

крытием TiN составила 300 мин, а с (Ti, Al, Si)N – 712 мин, что больше в 2,4 раза.

## Выводы

1. Выполнены исследования фазового состава и микроструктуры многокомпонентных СВС-прессованных катодных материалов. Продукты синтеза системы Ti–C–Al–Si состоят из МАХ-фазы состава  $Ti_3AlC_2$ , карбида (TiC), алюминида ( $Al_3Ti$ ) и силицидов ( $Ti_5Si_3$  или  $TiSi_2$ ) титана. В зависимости от расчетного содержания силумина (Al–10%Si) массовая доля МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  составляет 82–84 %, карбида TiC – 9÷12 %, алюминида  $Al_3Ti$  – 2,8÷7,8 % и силицидов титана – 1,0÷1,6 %. При этом с ростом содержания силумина происходят уменьшение доли карбидов и увеличение – алюминида и силицидов титана.

2. Проведен сравнительный анализ физических и функциональных свойств СВС-прессованных катодных материалов системы Ti–C–Al–Si. Показано, что металлоподобные соединения титана могут быть использованы в качестве электропроводящих материалов катодов вакуумно-дуговых устройств.

3. Из анализа термограмм горения получено, что температура плавления МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  составляет  $\approx 2100$  °С, что больше таковой титана, равной 1660 °С. Данный факт обуславливает и более высокий ток дуги СВС-катодов по сравнению с титановым катодом. Вместе с тем для всех исследованных составов СВС-катодов функционирование установки «Юнион» происходило в штатном режиме и получены вакуумно-дуговые покрытия на основе нитрида титана.

4. Все покрытия из СВС-катодов являются однофазными и представляют собой кубический нитрид титана состава (Ti, Al, Si)N. По сравнению с титановым катодом использование многокомпонентных СВС-катодов обеспечивает повышение всех исследованных свойств получаемых покрытий, кроме скорости роста. Несмотря на более высокий ток, объем микрокапельной фазы у покрытий из нитридов (Ti, Al, Si)N в 2,5–3,0 раза меньше, чем из TiN. Микроструктура покрытий (Ti, Al, Si)N не фрагментирована на столбчатые элементы, и размер ОКР в 2 раза меньше по сравнению с TiN. При примерно одинаковой твердо-

сти покрытия из СВС-катодов за счет более низкого модуля упругости существенно превосходят покрытия из TiN по стойкости к упругой деформации разрушения и сопротивлению пластической деформации. Покрытие, полученное из СВС-катода расчетного состава  $TiC_{0,5-20\%}(Al-10\%Si)$ , имеет нанотвердость  $H = 40 \div 42$  ГПа и является сверхтвердым.

5. Проведены опытно-промышленные испытания эксплуатационных свойств вакуумно-дугового покрытия (Ti, Al, Si)N, полученного из СВС-катода расчетного состава  $TiC_{0,5-20\%}(Al-10\%Si)$ . При фрезеровании вольфрамомедного сплава стойкость твердосплавных фрез с покрытием (Ti, Al, Si)N в 2,4 раза превысила таковую фрез с покрытием TiN, полученным из титанового катода с магнитной сепарацией плазменного потока.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Решетняк Е. Н., Стрельницкий В. Е. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2008. Т. 2. С. 119.
2. Амосов А. П., Латухин Е. И., Федотов А. Ф. и др. // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2011. № 1. С. 46.
3. Левашов Е. А., Погожев Ю. С., Рогачев А. С. и др. // Там же. 2010. № 3. С. 27.
4. Вадченко С. Г., Пономарев В. И., Сычев А. Е. // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42, № 2. С. 53.
5. Zhang E., Zeng S., Zeng X. et al. // Acta Metall. Sinica. 1995. Vol. 8, № 2. P. 130.
6. Jin S., Shen P., Zou B., Jiang Q. // Crystal Growth & Design. 2009. Vol. 9, № 2. P. 646.
7. Rogachev A. S., Gachon J.-C., Grigoryan H. E. et al. // J. Mater. Sci. 2005. Vol. 40. P. 2689.
8. Левашов Е. А., Погожев Ю. С., Штанский Д. В., Петржиж М. И. // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2008. № 3. С. 13.
9. Вакуумные дуги / Под ред. Дж. Лафферти. М.: Мир, 1987.
10. Эмсли Дж. Элементы. М.: Мир, 2003.
11. Самсонов Г. В., Винницкий И. М. Тугоплавкие соединения: Справочник. М.: Металлургия, 1976.
12. Самсонов Г. В., Дворина Л. А., Гельд П. В. Силициды. М.: Металлургия, 1979.
13. Wang X. H., Zhou Y. C. // J. Mater. Sci. Technol. 2010. Vol. 26, № 5. P. 385.
14. Мержанов А. Г. Твердопламенное горение. Черноголовка: ИСМАН, 2000.
15. Шулаев В. М., Андреев А. А., Столбовой В. А. и др. // Физ. инженерия поверхности. 2008. Т. 6, № 1–2. С. 105.
16. Мрочек Ж. А., Эйзнер Б. А., Иванов И. А. // Электрон. обраб. матер. 1990. № 1. С. 13.
17. Григорьев С. Н., Воронин Н. А. Технология вакуумно-плазменной обработки инструмента и деталей машин. М.: Станкин, Янус-К, 2005.