

УДК 661.88

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕДНОГО ЦЕНТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА В КОАКСИАЛЬНОМ УСКОРИТЕЛЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ШИХТЫ В СИСТЕМЕ ТI-N-CU

Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Евдокимов А.А.

*ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Томск, e-mail: gerasimov@tpu.ru*

В данной работе рассмотрен вопрос о возможности получения смесевой шихты состава «нитрид титана-медь» в гибридном коаксиальном магнитоплазменном ускорителе. В данной статье рассмотрен вопрос об изготовлении центрального электрода из меди с различной конфигурацией торцевой части. Были предложены три базовых конфигурации: электрод с плоским торцом, электрод с конусной выемкой на торце, электрод с конусным выступом на торце. Были исследованы следующие факторы: электроэрозионный износ электрода ствола и центрального электрода, массовый состав (по методу просвечивающей дифрактометрии), распределение частиц по размерам. Экспериментально показано, что использование центрального электрода с торцевой частью, выполненной в виде конуса, является более эффективным с точки зрения использования подводенной к ускорителю энергии для электроэрозионной наработки меди. Рентгеноструктурный анализ показал, что продукт динамического синтеза представляет собой смесь нанодисперсных кристаллических фаз нитрида и карбонитрида титана с небольшим содержанием нанодисперсных частиц меди. ОКР показывают, что продукт является нанодисперсным.

Ключевые слова: нитрид титана, медь, коаксиальный ускоритель, нанопорошки

USE COPPER CENTRAL ELECTRODE IN THE COAXIAL ACCELERATOR FOR IN CHARGE TI-N-CU

Sivkov A.A., Gerasimov D.Y., Evdokimov A.A.

Education «National Research Tomsk Polytechnic University», Tomsk, e-mail: gerasimov@tpu.ru

In this paper, we consider the possibility of obtaining mixtures of the charge of titanium nitride-copper hybrid coaxial magnetoplasma accelerator. This article discusses the issue of manufacturing the center electrode made of copper with a different configuration of the end. It was suggested that the three basic configurations – flat-face electrode, an electrode with a conical recess at the end of the electrode with the conical projection on the end face. The following factors were investigated: electroerosion electrode wear stem and the central electrode, the mass composition (TEM diffraction method) particle size distribution. Experimentally shown that the use of the center electrode with an end portion formed as a cone is more efficient in the use of power supplied to the accelerator for spark developments copper. XRD analysis showed that the product is a dynamic synthesis mixture nanosized crystalline phases of titanium nitride and carbonitride with a small amount of nanosized particles of copper. OCD show that the product is nanodispersed.

Keywords: titanium nitride, copper, coaxial accelerator, nanopowders

Технический прогресс ставит перед материаловедением задачи по созданию новых материалов с уникальными эксплуатационными свойствами. Такие структуры должны выдерживать воздействие высоких температур и механических сил, работать в агрессивных средах, активно сопротивляться абразивному износу, также обладать высокими значениями трещиностойкости, прочности и твердости. Такими свойствами может обладать керамика, полученная прессованием и спеканием сверхтвердых порошковых материалов с нанокристаллической структурой [1].

Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель (КМПУ) [2–4] с титановыми электродами марки ВТ1-0 при электропитании от емкостного накопителя энергии позволяет получать нанодисперсные порошкообразные материалы состава нитрида титана. Динамический синтез происходит при распылении электроэрозионной плазмы в камеру-реактор, заполненную техниче-

ским азотом. Сильноточный дуговой разряд вызывает электроэрозионный износ электродов и ускоряется под действием газокинетических и электромагнитных сил [5]. Эта эрозионная плазма разряда выносится в камеру-реактор со скоростью 1–10 км/с, где синтезируется порошкообразный материал.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных и аналитических исследований по получению шихты сверхтвердого нанодисперсного материала состава нитрида титана с включением меди, использующейся в качестве связующего элемента. Основной материал (титан), необходимый для синтеза нитрида титана, нарабатывается электроэрозионным путем с поверхности ускорительного канала (УК) титанового электрода-ствола КМПУ. Введение меди в состав шихты происходит за счет электроэрозионной наработки материала с центрального электрода (ЦЭ) ускорителя, который выполняется из меди. Выбор

меди, в качестве связующего, обусловлен следующими факторами:

- 1) в качестве связующего используется более мягкий металл;
- 2) медь имеет относительно низкую температуру плавления;
- 3) медь относительно инертна.

Экспериментальные исследования проведены при следующих условиях: емкость накопителя энергии $C = 24$ мФ, зарядное напряжение $U_{\text{зар}} = 4,0$ кВ, материал ЦЭ – медь, электрод-ствол – титан с диаметром УК $d_{\text{ук}} = 21$ мм, камера-реактор заполнялась азотом до нормального давления. Иницирование сильноточного дугового разряда типа Z-пинч осуществлялось путем пробоя по поверхности изолятора центрального электрода. Для увеличения проводимости

на поверхность изолятора ЦЭ наносилось небольшое количество графита. При проведении экспериментов регистрировались напряжение на электродах ускорителя $U(t)$ и рабочий ток $i(t)$. Кривая мощности разряда $P(t)$ строилась путем произведения напряжения и тока в соответствующие моменты времени. Подведенная к ускорителю энергия W определялась интегрированием кривой мощности. Осциллограммы напряжения на электродах ускорителя $U(t)$, рабочий ток $i(t)$, кривая мощности разряда $P(t)$ и подведенной энергии $W(t)$, соответствующие опыту 1 (табл. 1), приведены на рис. 1, а устройство и принцип действия КМПУ при электропитании от емкостного накопителя энергии описано в [3]. Основные экспериментальные данные приведены в табл. 1.

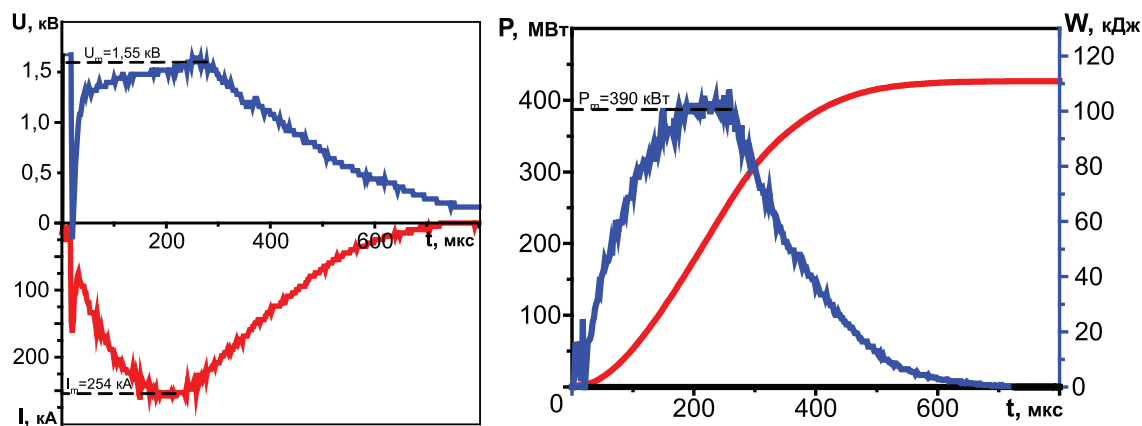


Рис. 1. Электрические параметры дугового разряда КМПУ (табл. 1, опыт 1).

Таблица 1

Основные экспериментальные данные по получению шихты сверхтвёрдого материала

Параметры/номер опыта	1	2
Геометрия центрального электрода	плоский	конусный
Максимальное напряжение U_m , кВ	1,55	1,42
Максимальный ток I_m , кА	254	260
Подведенная энергия W , кДж	110	99
Длина ствола $L_{\text{СТ}}$, мм	234	239
Эродированная масса ствола $\Delta m_{\text{СТ}}$, г	20,6	18,9
Удельная эродированная масса ствола $\Delta m_{\text{СТ}}/W$, мг/кДж	187	191
Эродированная масса ЦЭ $\Delta m_{\text{ЦЭ}}$, г	0,72	0,89
Удельная эродированная масса ЦЭ $\Delta m_{\text{ЦЭ}}/W$, мг/кДж	6,6	9,0

Анализ экспериментальных данных, приведенных в табл. 1, показывает, что энергетические параметры опытов 1 и 2 близкие и отличаются незначительно. В эксперименте 1 использовался центральный электрод с плоской торцевой частью, а в опыте 2 торцевая часть ЦЭ выполнена

в виде конуса. Данное техническое решение обеспечивает более чем на 30% увеличение удельной эрозии поверхности ЦЭ и наработки меди (в опыте 1 удельная эродированная масса центрального электрода $\Delta m_{\text{ЦЭ}}/W = 6,6$ г, а в опыте 2 $\Delta m_{\text{ЦЭ}}/W = 9,0$ г). Таким образом, использование ЦЭ с торце-

вой частью, выполненной в виде конуса, является более эффективным с точки зрения использования подведенной к ускорителю энергии для электроэрозионной наработ-

ки меди. Следует отметить, что изменение геометрии ЦЭ практически не сказывается на величине эрозионного износа электрода-ствала Δm_{CT} .

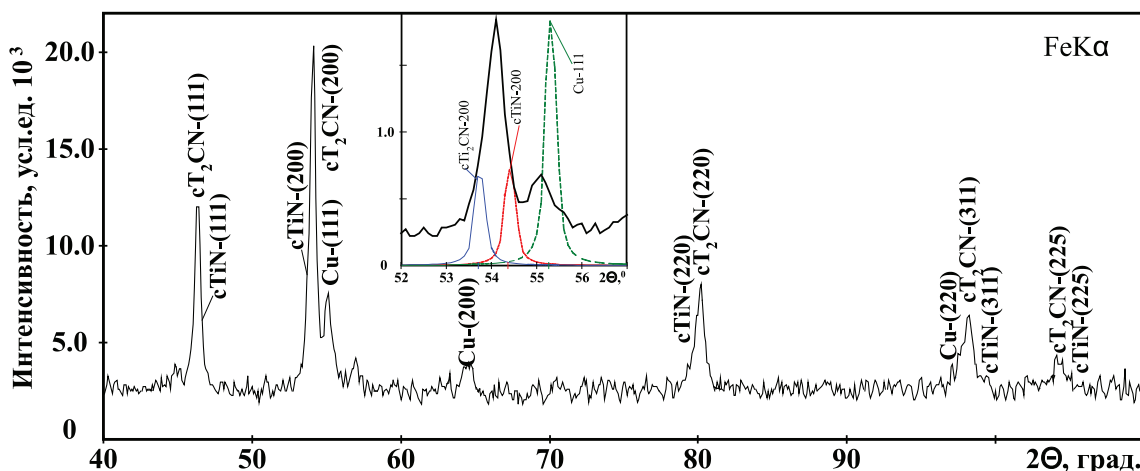


Рис. 2. XRD-спектр порошкообразного продукта динамического синтеза

Таблица 2

Основные данные рентгеноструктурного анализа порошкообразного продукта

Кристаллическая фаза	hkl	2θ°		d, Å		Содержание, %	Параметр решетки a, нм		ОКР, нм	Δd/d · 10 ⁻³
		эксп.	PDF	эксп.	PDF		Эксп.	PDF		
cTiN	111	46,516	46,576	2,4515	2,4485	60	4,2462	4,2440	37	1,36
	200	54,254	54,325	2,1231	2,1205					
	220	80,305	80,423	1,5012	1,4994					
cTi ₂ CN	111	46,335	46,059	2,4606	2,4745	30	4,2619	4,2860	22	0,94
	200	54,037	53,709	2,1309	2,1430					
	220	79,947	79,410	1,5068	1,5153					
Cu	111	55,225	55,267	2,0886	2,0871	10	3,6176	3,6150	17	0,94
	200	64,714	64,765	1,8088	1,8075					
	220	98,379	98,473	1,2790	1,2781					

Для определения качественных характеристик продукт динамического синтеза был подвергнут таким аналитическим исследованиям, как рентгеноструктурный анализ и просвечивающая электронная микроскопия. На рис. 2 приведен XRD-спектр порошкообразного материала, полученного с использованием дифрактометра Shimadzu XRD 6000 (CuKα-излучение). Количественный структурно-фазовый анализ дифрактограмм проведен с помощью программы полнопрофильного анализа Powder Cell 2.4 и базы структурных данных PDF4+. В табл. 2 сведены основные данные полнопрофильного анализа: значения межплоскостных расстояний, соотношение кристаллических фаз в массовых процентах, параметры кристаллической решетки, средний размер области коге-

рентного рассеяния (ОКР) и величина внутренних упругих микронапряжений Δd/d. Анализ рентгеновского дифракционного спектра, приведенного на рис. 2, однозначно показал, что синтезированный продукт представляет собой нанодисперсную композицию трех кристаллических фаз: cTiN, cTi₂CN и Cu (F4/m-3 2/m).

Рентгеноструктурный анализ показывает, что основной составляющей полученного порошка является нитрид титана. Также в пробе присутствует и карбонитрид титана, обусловленный примесью углерода с поверхности изолятора ЦЭ. Фракция меди в исследуемой пробе присутствует в небольшом количестве. Следует отметить, что для фазы cTi₂CN заметно расхождение экспериментальных и теоретических значений параметров решетки (a). По-видимому, это

обусловлено не только искажением и дефектностью решетки, но и погрешностью метода полнопрофильного анализа, которая вызвана тем, что основные теоретические линии всех трех фаз расположены в одном, очень узком диапазоне 2θ , как это видно на выделенном участке дифрактограммы с сильнейшими стандартными дифракци-

онными рефлексами: 200-сTiN; 200-сTi₂CN и 111-Cu, наложенными на сильнейший рефлекс экспериментального спектра. Из анализа ТЕМ-микроснимков (рис. 3) следует, что средний размер большинства сферообразных частиц менее 100 нм и соответствует средним размерам ОКР (табл. 2) анализируемых фаз.

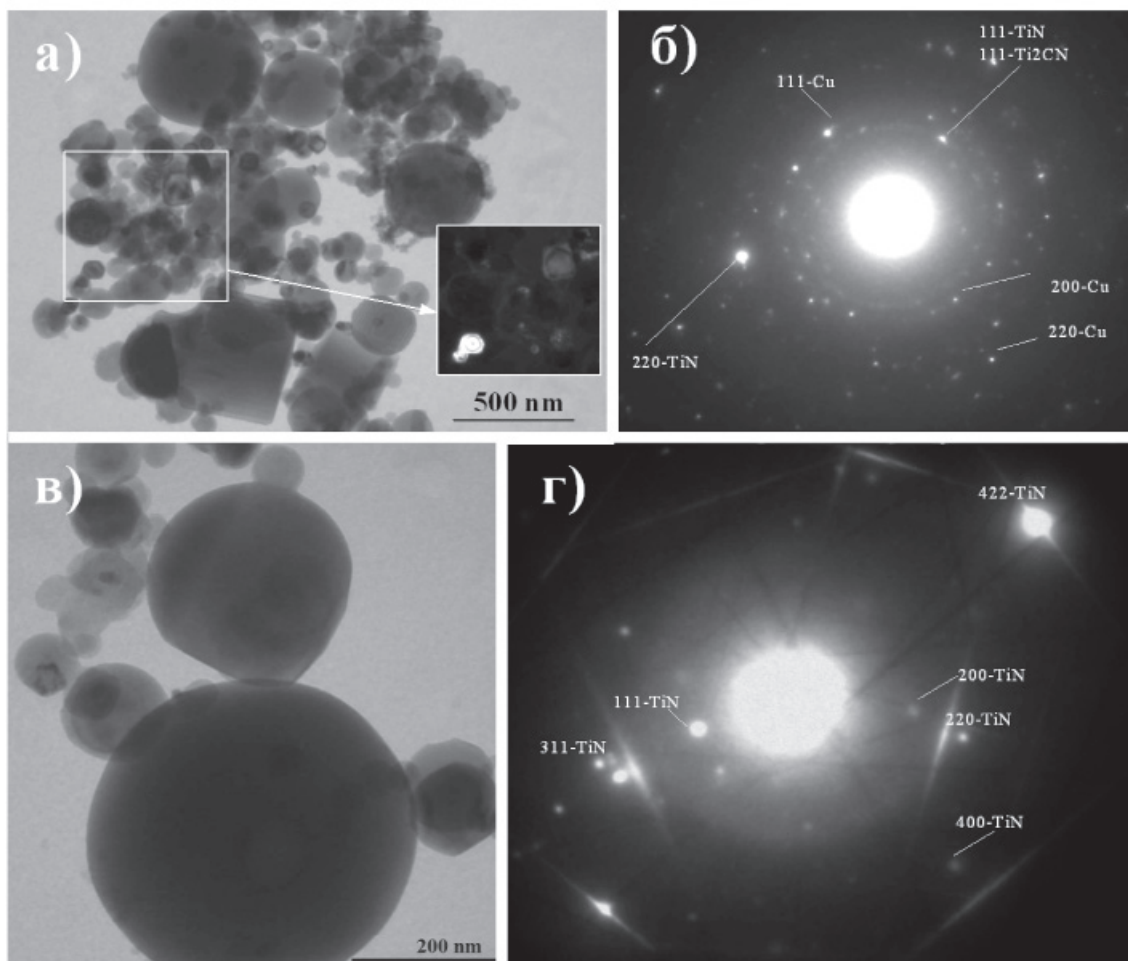


Рис. 3. Данные ТЕМ-исследований порошкообразного материала:
а, в – светлопольные ТЕМ-микроснимки с фрагментом темнопольного (а)
и соответствующие им электронные дифракции (б, г)

При этом незначительную долю составляют частицы размерами до ~ 500 нм. Это свидетельствует о бимодальности распределения по размерам. Картина электронной дифракции, снятая на большом скоплении частиц (рис. 3, а, б), насыщена большим числом слабых рефлексов основных нанодисперсных фаз, которые образуют концентрические кольца. Кроме того, присутствуют и сильные рефлексы дифракции на крупных кристаллах. На картине электронной дифракции, снятой на небольшом скоплении самых крупных частиц

(рис. 3, в, г), отчетливо выделяются дифракционные максимумы, соответствующие нитридным фазам.

Заключение

В настоящей работе показана возможность использования КМПУ с медным центральным электродом для получения шихты сверхтвердого материала на основе TiN-Cu. Экспериментально показано, что использование центрального электрода с торцевой частью, выполненной в виде конуса, является более эффективным с точ-

ки зрения использования подведенной к ускорителю энергии для электроэрозионной наработки меди. Рентгеноструктурный анализ показал, что продукт динамического синтеза представляет собой смесь нанодисперсных кристаллических фаз нитрида и карбонитрида титана с небольшим содержанием нанодисперсных частиц меди. ОКР показывают, что продукт является нанодисперсным.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ на 2013–2014 годы (номер 14.124.13.5028-МК).

Список литературы

1. Акарачкин С.А. Технология производства нанокерамики // Современное состояние, перспективы развития технологии и производства керамики: тез. докл. Первой научно-технической конференции / НЭВЗ-Союз. – Новосибирск, 2009. – С. 250–253.
2. Патент на полезную модель № 61856 РФ. Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель / Герасимов Д.Ю., Сайгаш А.С., Сивков А.А.
3. Патент № 2442095 РФ. 7F41V 6/00 H05H 11/00. Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель / Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Евдокимов А.А., Опубликовано 10.02.2012 Бюл. № 4.
4. Патент № 2459394 РФ H05H 5/03 Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель / Евдокимов А.А., Сивков А.А., Герасимов Д.Ю. – Опубликовано 20.08.2012 Бюл. № 23.
5. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Электроэрозионная наработка материала в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе для нанесения покрытий // Электротехника. – 2005. – № 6. – С. 25–33.

References

1. Akarachkin S.A. Technology of production of nanoceramics // Current state and prospects of development of technology and the production of ceramics Proc. Abstracts. The first scientific conference / NEVZ-Union – Novosibirsk, 2009 pp. 250–253.
2. A utility model patent number 61856 Russian Federation. Coaxial magnetoplasma accelerator / Gerasimov D.Y., Saygash A.S., A.A. Sivkov.
3. Patent number 2442095 Russian Federation. 7F41V 6/00 H05H 11/00. Coaxial magnetoplasma accelerator / Sivkov A.A., Gerasimov D.Y., Evdokimov A.A., Posted 10.02.2012 Bull. number 4.
4. Patent number 2459394 RF H05H 5/03 Coaxial magnetoplasma accelerator / Evdokimov A.A., Sivkov A.A. Gerasimov D.Y. Posted 20.08.2012 Bull. no. 23.
5. Sivkov AA Gerasimov DY, AS Tsybina Spark of fissile material in a coaxial magnetoplasma accelerator coating // Electrical Engineering. 2005. no. 6. pp. 25–33.

Рецензенты:

Касимов В.З., д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, зав. лабораторией № 72, Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск;

Найден Е.П., д.ф.-м.н., профессор, Научно-образовательный центр «Функциональные материалы радио и оптоэлектроники», Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск.

Работа поступила в редакцию 01.08.2013.