

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВС-ПРЕССОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КАТОДОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Ti-V ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2011 С.И. Алтухов, А.А. Ермошкин, К.С. Сметанин,
А.Ф. Федотов, В.Н. Лавро, Е.И. Латухин, А.П. Амосов

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 04.02.2011

Исследовано влияние составов алюминий- и кремнийсодержащих материалов системы Ti - V на технологические свойства СВС-прессованных катодов для нанесения вакуумно-дуговых покрытий. Для получения бездефектных заготовок и катодов шихта рабочего слоя должна состояться из расчета достаточного содержания в продуктах СВС титановой связки. В системе Ti - V - Al расчетная массовая концентрация свободного титана должна составлять не менее 35%; в системе Ti - V - Si – не менее 10%. Система Ti - V - Al - Si исследованных составов является нетехнологичной как при СВС-прессовании многослойных заготовок, так и при их механической обработке.

Ключевые слова: СВС-прессование, многокомпонентные катоды, вакуумно-дуговые покрытия.

Современная машиностроительная промышленность уделяет особое внимание повышению надежности и производительности металлорежущего инструмента. В связи с этим разработка новых износостойких покрытий, обладающих высокими твердостью, трещиностойкостью и адгезионной прочностью является актуальной задачей. В последнее время в мире ведутся интенсивные исследования по получению сверхтвердых нанокompозитных покрытий. Среди существующих методов наибольшее распространение получил метод нанесения покрытий из потоков металлической плазмы вакуумной дуги [1]. Получение нанокompозитных покрытий вакуумно-дуговым методом требует осаждения на подложку многокомпонентных потоков плазмы. Эти потоки могут быть получены одновременным испарением отдельных однокомпонентных катодов или одного многокомпонентного

катада, содержащего компоненты наносимого покрытия. При использовании отдельных катодов необходимый элементный состав потока достигается сложным и трудоемким подбором технологических режимов распыления каждого из катодов, состава и давления реакционного газа. В этой связи интерес представляют исследования, в которых нанокompозитные покрытия получают на промышленных установках при испарении одного многокомпонентного катада.

Главным недостатком вакуумно-дугового метода является наличие в плазме большого количества микрокапель испаряемого материала катада, существенно ухудшающих качество и эксплуатационные свойства покрытия. Эта проблема решается путем использования разнообразных устройств для сепарации плазмы, что существенно усложняет и удорожает вакуумно-дуговые установки. Количество капельной фазы уменьшается при росте температуры плавления катодного материала. Поэтому научный и практический интерес представляет изучение возможности получения вакуумно-дуговых нанокompозитных покрытий из многокомпонентных катодов на основе металлоподобных тугоплавких соединений переходных металлов, в частности карбидов и боридов титана.

Традиционно композиционные материалы на основе тугоплавких соединений получают спеканием или горячим прессованием. Эти технологии являются энергоемкими, многостадийными, требуют дорогостоящих печей с защитной атмосферой или вакуумом. Кроме того, сами тугоплавкие компоненты композиционного материала получают в основном также энергоемким печным синтезом. Альтернативой технологиям

Алтухов Сергей Игоревич, аспирант кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы». E-mail: altuhov_serg@mail.ru

Ермошкин Андрей Александрович, аспирант, ассистент той же кафедры. E-mail: ermandr@ya.ru

Сметанин Кирилл Сергеевич, аспирант, инженер той же кафедры. E-mail: smks@inbox.ru

Федотов Александр Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры «Механика». E-mail: a.fedotov50@mail.ru

Лавро Виктор Николаевич, доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы». E-mail: lavro7@mail.ru

Латухин Евгений Иванович, кандидат технических наук, доцент той же кафедры. E-mail: evgelat@yandex.ru

Амосов Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», E-mail: mvmt@samgtu.ru

печного синтеза и спекания служит самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [2]. В основе СВС лежат реакции экзотермического взаимодействия химических элементов или соединений, протекающих в режиме горения. Процесс синтеза целевого продукта идет за счет тепла химических реакций и не требует внешней энергии для нагрева. Высокая температура СВС-процесса (2000 °С и выше) обеспечивает синтез многокомпонентных и композиционных материалов на основе тугоплавких соединений непосредственно в волне горения. Высокоэкзотермические реакции позволяют вводить в порошковую смесь реагентов инертные компоненты и получать самые разнообразные по составу материалы.

Проведение в одной установке сначала СВС композиционного материала, а затем силового уплотнения горячих продуктов синтеза (технология СВС-прессования) позволяет в одну стадию получать высокоплотные заготовки из материалов на основе тугоплавких соединений [3]. Синтез целевого материала из шихтовой заготовки в режиме горения происходит за 5 – 10 с, а продолжительность одного цикла СВС-прессования составляет не более 10 – 15 мин. Изготовление аналогичной заготовки спеканием инертных порошков под давлением длится несколько часов.

Катоды электродуговых испарителей, охлаждаются водой и имеют сложную форму. Методом СВС-прессования невозможно получить высокоплотный монолитный катод требуемой формы. Поэтому в настоящее время из СВС-материалов изготавливаются фрагменты простой формы в виде пластин, которые механически или пайкой крепятся к водоохлаждаемому медному катоду при магнетронном напылении [4] или к специальной водоохлаждаемой державке при вакуумно-дуговом напылении [5]. При этом механическое крепление не обеспечивает эффективного охлаждения катода или мишени, а для соединения пайкой материалов на основе тугоплавких соединений необходимо применять специальные дорогостоящие припои, а также специальное оборудование и энергозатраты на нагрев соединяемых деталей. В этой связи желательно осуществить соединение продуктов СВС с водоохлаждаемым элементом в одну стадию непосредственно при синтезе катодного материала.

Анализ известных результатов исследований составов и свойств многокомпонентных вакуумно-дуговых покрытий на основе титана показывает, что в настоящее время наиболее перспективными для получения нанокomпозитных покрытий являются алюминий- и кремнийсодержащие катоды [6 - 9]. В работах [10, 11] разработана технология получения многокомпонентных СВС-прес-

сованных катодов в системе Ti - С на основе нестехиометрического карбида титана $TiC_{0.5}$. Были получены катодные СВС-материалы на основе нестехиометрического карбида титана $TiC_{0.5}$ с максимальным содержанием алюминия 35% и кремния 25%. (Здесь и далее указываются массовые концентрации компонентов). В настоящей работе исследовано влияние составов алюминий- и кремнийсодержащих многокомпонентных материалов системы Ti - В на технологические свойства СВС-прессованных катодов электродуговых испарителей.

Конструктивно СВС-прессованный катод представляет собой четырехслойное функционально-градиентное изделие [11] и состоит из металлического основания и трех слоев продуктов СВС: рабочего слоя, промежуточного слоя и СВС-припоя (рис. 1). Рабочий слой является собственно многокомпонентным испаряемым материалом, СВС-припой обеспечивает соединение продуктов синтеза с металлическим основанием, промежуточный слой имеет повышенную пластичность и соединяет рабочий слой и СВС-припой. Металлическое основание с водоохлаждаемой донной частью изготавливается из нержавеющей стали 12Х8Н9Т. Бездефектный СВС-прессованный катод с рабочим слоем на основе карбида титана $TiC_{0.5}$ массой 70 г получается при использовании СВС-припоя $TiB_2 + 45\% Cu$ массой 30 г и промежуточного слоя $TiB_2 + 75\% (Cu - 30\% Ni)$ массой 15 г [11]. Этот технологический вариант использовался и при получении многокомпонентных СВС-прессованных катодов в системе Ti-В.

При составлении экзотермических шихт использовались порошки следующих марок: титан ПТС; алюминий ПА-4, кремний КР-0, медь ПМС-1, никель электролитический ПНЭ-1 и бор аморфный коричневый. Дозировка компонентов шихты осуществлялась с точностью 0,1 г. Приготовление экзотермической шихты массой 0,2 кг заданного состава производилось в шаровой мельнице объемом 1 л при соотношении масс шаров и шихты 3:1. Время смешивания состав-

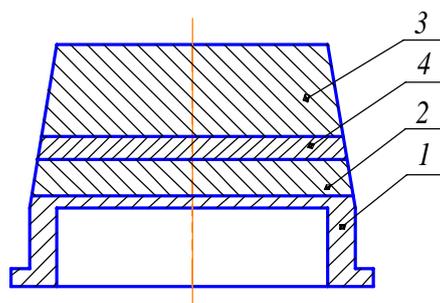


Рис. 1. Конструкция четырехслойного СВС-прессованного катода

1 – металлическое основание; 2 – СВС-припой; 3 – рабочий слой; 4 – промежуточный слой

ляло 4 часа. Из шихтовых смесей односторонним прессованием в цилиндрической матрице получали трехслойные шихтовые заготовки диаметром 54 мм с относительной плотностью 0,5 - 0,55. Синтез и силовое компактирование горячих продуктов синтеза осуществляли в цилиндрической пресс-форме-реакторе диаметром 125 мм на гидравлическом прессе модели Д-1932. Силовые параметры процесса во всех экспериментах были неизменными и составляли: давление подпрессовки 18 МПа, максимальной давление прессования 125 МПа. После извлечения из пресс-формы-реактора СВС-прессованные заготовки помещали в печь, предварительно разогретую до температуры 700 - 750 °С, и затем охлаждали вместе с печью до комнатной температуры.

Анализ результатов экспериментальных исследований по получению многослойных катодов методом СВС-прессования позволил выделить три основных вида неустраняемых дефектов:

1) отсутствие бездефектного соединения (сварки) рабочего слоя с остальными функциональными слоями;

2) растрескивание рабочего слоя при охлаждении синтезированной заготовки до комнатной температуры при бездефектном соединении функциональных слоев;

3) образование макротрещин в рабочем слое при механической обработке бездефектных заготовок.

Первые два дефекта характеризуют низкую технологичность материала рабочего слоя при СВС-прессовании; третий вид – при механической обработке заготовок.

В первой серии экспериментов рабочий слой синтезировали из СВС-материала на основе диборида титана TiB_2 , образующегося в результате экзотермической реакции $Ti + 2B = TiB_2$. Температура горения этой реакции составляет $T_r = 2920$ °С [2]. Рассматривали два расчетных состава с алюминием: $TiB_2 + 20\% Al$ и $TiB_2 + 30\% Al$ и один состав с кремнием: $TiB_2 + 20\% Si$. При указанном содержании алюминия и кремния в рабочем слое на основе нестехиометрического карбида титана $TiC_{0,5}$ были получены бездефектные катоды. Однако в случае рабочего слоя на основе диборида титана при охлаждении заготовок происходило

разрушение по контактной поверхности и прилегающих к ней объемам промежуточного и рабочего слоев. Сам рабочий слой имеет очень высокую хрупкость и в его объеме образуется множество глубоких радиальных макротрещин.

С целью уменьшения хрупкости во второй серии экспериментов рабочий слой формировался на основе моноборида титана TiB . Микротвердость моноборида титана составляет $H_m = 27,5$ ГПа и меньше микротвердости диборида титана, которая равна $H_m = 33,7$ ГПа. Соответственно моноборид титана более пластичен, чем диборид титана. Моноборид титана образуется в результате экзотермической реакции $Ti + B = TiB$. Тепловой эффект образования моноборида TiB меньше, чем тепловой эффект образования диборида TiB_2 и температура горения составляет $T_r = 2300$ °С [2]. Были синтезированы катоды с различными расчетными составами рабочего слоя в системах $Ti - B - Al$, $Ti - B - Si$ и $Ti - B - Al - Si$ (табл. 1). Рассматривали два расчетных варианта присутствия алюминия в материале рабочего слоя – в виде химического элемента и в виде компонента химического соединения, который являлся алюминид титана $Ti_{0,4}Al_{0,6}$.

Результаты экспериментов показали, что для всех исследованных составов рабочего слоя на основе моноборида TiB , как и для составов на основе диборида TiB_2 , не обеспечивается прочное и бездефектное соединение рабочего и промежуточного слоев. При этом происходит разрушение объемов рабочего слоя в зоне его контакта с промежуточным слоем и самого промежуточного слоя. Рабочий слой сохраняет повышенную хрупкость, но количество радиальных макротрещин и их глубина меньше, чем у рабочего слоя на основе диборида титана.

В системе $Ti - B$ методом СВС могут быть получены не только моноборид или диборид титана. Моноборид титана TiB синтезируется при эквиатомном составе шихты, что в массовых долях соответствует шихте состава $Ti - 18,4\% B$. При содержании титана сверх эквиатомного состава при СВС образуется моноборид титана, а избыток титана служит металлической связкой. В результате синтезируются твердые сплавы состава $TiB - Ti$, получившие название СТИМ-4 [2].

Таблица 1. Расчетные составы рабочего слоя на основе моноборида титана TiB

СВС-система	Расчетный состав продуктов синтеза рабочего слоя
$Ti - B - Al$	$TiB + 20\% Al$; $TiB + 25\% Al$; $TiB + 30\% Al$ $TiB + 40\% Ti_{0,4}Al_{0,6}$; $TiB + 50\% Ti_{0,4}Al_{0,6}$
$Ti - B - Si$	$TiB + 15\% Si$; $TiB + 20\% Si$; $TiB + 40\% Ti_5Si_3$; $TiB + 40\% Ti_5Si_3$
$Ti - B - Al - Si$	$TiB + 20\% (Al-10\% Si)$; $TiB + 25\% (Al-10\% Si)$ $TiB + 30\% (Al-10\% Si)$; $TiB + 40\% (Ti_{0,4}Al_{0,6}-10\% Si)$; $TiB + 50\% (Ti_{0,4}Al_{0,6}-10\% Si)$

Таблица 2. Расчетные составы рабочего слоя на основе СВС-смеси Ti-16% В

СВС-система	Расчетный состав продуктов синтеза рабочего слоя
Ti - 16% В - Al	(TiB-13% Ti) + 20% Al; (TiB-13% Ti) + 40% Ti _{0,4} Al _{0,6}
Ti - 16% В - Si	(TiB-13% Ti) + 10% Si; TiB + 15% Si; (TiB-13% Ti) + 20% Si
Ti - 16% В - Al - Si	(TiB-13% Ti) + 20% (Al-10% Si); (TiB-13% Ti) + 20% (Al-20% Si) (TiB-13% Ti) + 40% (Ti _{0,4} Al _{0,6} -20% Si)

Титановая связка повышает пластичность синтезируемого материала [3]. Учитывая позитивное влияние увеличения пластичности рабочего слоя на качество СВС-прессованных катодов, в третьей серии экспериментов рабочий слой формировался на основе композиции Ti - 16% В. Концентрация титана превышает эквивалентную концентрацию и продуктом синтеза в этой системе является твердый сплав состава TiB-13% Ti. По аналогии с предыдущими экспериментами были рассмотрены композиции с добавками алюминия и кремния (табл. 2).

Результаты экспериментов показали, что присутствие в продуктах синтеза избыточного титана и увеличение пластичности рабочего слоя в целом оказало положительное влияние на качество синтезированных заготовок. При синтезе рабочего слоя в системе Ti - 16% В - Si прекратилось образование радиальных макротрещин в объеме рабочего слоя, но соединения рабочего и промежуточного слоёв не происходит. Для систем Ti - 16% В - Al и Ti - 16% В - Al - Si макротрещины в рабочем слое также не образуются. Однако продолжает разрушаться зона контакта рабочего и промежуточного слоёв. В этой зоне образуется кольцевая трещина, длина которой составляет примерно 20 ч 30% от периметра рабочего слоя. Визуальный осмотр после разрушения синтезированной заготовки по зоне контакта рабочего и промежуточного слоёв показал, что глубина кольцевой трещины мала и не превышает 5 мм. Указанные выше длина и глубина кольцевой трещины выявлены после черновой обработки боковой поверхности заготовки от песчаной корки на абразивном круге. Однако после чистового шлифования длина и глубина кольцевой трещины увеличиваются. Причину роста размеров кольцевой трещины следует связать с появлением температурных напряжений в синтезированном материале вследствие локального разогрева зоны шлифования и разных коэффициентов температурного расширения слоёв. В результате действия технологических температурных напряжений и происходит рост трещины, являющейся концентратором напряжений. Таким образом, использование композиции Ti - 16% В как основного реагента при формировании материала рабочего слоя

не привело к получению бездефектных СВС-прессованных катодов.

С целью дальнейшего увеличения пластичности в следующей серии экспериментов рабочий слой формировался на основе композиции Ti - 12% В, в которой продуктом синтеза является твердый сплав состава TiB - 35% Ti. Расчетные составы синтезируемого рабочего слоя с добавками алюминия и кремния приведены в табл. 3.

При синтезе рабочего слоя в системе Ti - 12% В - Al для всех исследованных составов (табл. 3) были получены как бездефектные заготовки, так и бездефектные изделия после чистового шлифования заготовок. С целью увеличения пластичности материала рабочего слоя были синтезированы заготовки на основе СВС-композиции Ti - 12% В с повышенным содержанием алюминия: 25, 30, 35 и 40%. Для всех вариантов были получены бездефектные заготовки с хорошим качеством сварки слоёв. Однако при механической обработке в рабочем слое образовывались макротрещины. Кроме того, при 40% -ом содержании алюминия рабочий слой получается пористым. Пористость является одним из следствий влияния инертных металлических компонентов на уплотняемость горячих продуктов синтеза. С одной стороны, легкоплавкие металлические компоненты при температуре синтеза находятся в жидком состоянии и обеспечивают высокую пластичность и уплотняемость горячих продуктов синтеза. С другой стороны, не вступающие в реакцию инертные компоненты, уменьшают температуру горения и, как следствие, уплотняемость продуктов СВС [3]. Ограничение сверху на содержание инертных компонентов является основным недостатком СВС-технологий, в том числе и СВС-прессования. Для рассматриваемой СВС-композиции Ti - 12% В - Al этот эффект начинает проявляться при содержании алюминия свыше 35%. Таким образом, наши результаты показали, что с точки зрения получения бездефектных многослойных катодов содержание алюминия в системе Ti - 12% В - Al не должно превышать 23%.

Положительного результата при синтезе рабочего слоя в системах Ti - 12% В - Si и Ti - 12% В - Al - Si получить не удалось. При синтезе ра-

Таблица 3. Расчетные составы рабочего слоя на основе СВС-смеси Ti - 12% В

СВС-система	Расчетный состав продуктов синтеза	Содержание алюминия, %
Ti - 12% В - Al	(TiB-35% Ti) + 15% Al;	15
	(TiB-35% Ti) + 20% Al;	20
	(TiB-35% Ti) + 20% Ti _{0,4} Al _{0,6}	9
	(TiB-35% Ti) + 50% Ti _{0,4} Al _{0,6}	23
Ti - 12% В - Si	(TiB-35% Ti) + 15% Si;	-
	(TiB-35% Ti) + 20% Si	-
Ti - В - Al - Si	(TiB-35% Ti) + 20% (Al-20% Si)	16
	(TiB-35% Ti) + 50% (Ti _{0,4} Al _{0,6} -20% Si)	18

бочего слоя в системе Ti - 12% В - Si рабочий и промежуточный слои соединяются между собой, но в зоне контакта этих слоёв уже в заготовке образуется замкнутая кольцевая трещина. В случае рабочего слоя, синтезируемого в системе Ti - В - Al - Si, длина кольцевой трещины в заготовках до чистой механической обработки составляет приблизительно 30% от периметра рабочего слоя, но после шлифования её длина увеличивается примерно в 2 раза.

В целом результаты проведенных исследований по СВС-прессованию многокомпонентных катодов показывают, что наибольшие технологические проблемы связаны с получением рабочего слоя с высоким содержанием кремния. Это обстоятельство отмечается и при изготовлении кремнийсодержащих титановых катодов другими методами [12]. Результаты наших экспериментов в СВС-системах Ti - 2В, Ti - В, Ti - 16% В и Ti - 12% В показали, что для всех вариантов не удалось получить бездефектные заготовки. В композициях на основе диборида или моноборида титана рабочий слой имеет очень высокую хрупкость и в нем уже при охлаждении синтезированных заготовок образуются макротрещины. При использовании СВС-композиций Ti - 16% В и Ti - 12% В с избыточным содержанием титана в продуктах синтеза уменьшается хрупкость рабочего слоя и он не разрушается. Вместе с тем бездефектного соединения функциональных слоев между собой не происходит. В качестве основной причины низкой технологичности при СВС-прессовании композиций с избыточным содержанием титана было принято следующее предположение. При СВС избыточный титан образует с кремнием силициды Ti_xSi_y различного состава. В результате получается композит состава

TiB + Ti_xSi_y, который не содержит металлическую связку и имеет низкие технологические свойства. Учитывая сказанное, при дальнейших исследованиях в системе Ti - В - Si шихта составлялась так, чтобы продукты синтеза содержали моноборид титана TiB, кремний в виде силицида титана Ti₅Si₃ и избыточный титан. Соответствующие расчетные составы продуктов СВС и содержание кремния в них приведены в табл. 4.

Несмотря на сравнительно низкое содержание свободного титана для всех рассмотренных составов были получены бездефектные заготовки. Также не имели дефектов и готовые изделия после механической обработки заготовок. Таким образом, для системы Ti - В - Si необходимым условием получения многослойных СВС-катодов является присутствие в продуктах синтеза рабочего слоя 10 - 20% титановой связки.

При получении СВС-прессованных катодов в системе Ti - В - Al - Si были продолжены исследования с использованием СВС-композиции Ti - 12% В. Расчетные составы рабочего слоя представлены в табл. 5.

Бездефектные заготовки были получены только для двух составов рабочего слоя: (TiB-35% Ti) + 25% (Al-20% Si) и (TiB-35% Ti) + 50% (Ti_{0,4}Al_{0,6}-20% Si). Однако эти составы оказались не технологичными при механической обработке, и в рабочем слое происходило образование макротрещин. Не привело к положительному результату и уменьшение содержания кремния в связке Al - Si с 20 до 10%. В этом варианте рабочий слой не сваривался с остальными слоями. Отрицательный результат был получен и для расчетного варианта получения продуктов синтеза, при котором кремний и избыточный титан образуют силицид титана, а алюминий - метал-

Таблица 4. Расчетные составы рабочего слоя на основе СВС-композиции Ti-В

СВС-система	Расчетный состав продуктов синтеза рабочего слоя	Содержание кремния, %
Ti - В - Si	TiB + 40% Ti ₅ Si ₃ + 20% Ti	10,4
	TiB + 48% Ti ₅ Si ₃ + 20% Ti	12,5
	TiB + 50% Ti ₅ Si ₃ + 20% Ti	13,0
	TiB + 60% Ti ₅ Si ₃ + 20% Ti	15,6
	TiB + 60% Ti ₅ Si ₃ + 10% Ti	15,6

Таблица 5. Расчетные составы рабочего слоя на основе СВС-композиции Ti-12% В

СВС-система	Расчетный состав продуктов синтеза	Содержание кремния, %
Ti – 12% В – Al – Si	(TiB-35% Ti) + 25% (Al-20% Si)	5,0
	(TiB-35% Ti) + 30% (Al-20% Si)	6,0
	(TiB-35% Ti) + 40% (Al-20% Si)	8,0
	(TiB-35% Ti) + 40% (Ti _{0,4} Al _{0,6} -20% Si)	8,0
	(TiB-35% Ti) + 50% (Ti _{0,4} Al _{0,6} -20% Si)	10,0
	(TiB-35% Ti) + 30% (Al-10% Si)	3,0
	(TiB-35% Ti) + 40% (Al-10% Si)	4,0
	(TiB-35% Ti) + 40% (Ti _{0,4} Al _{0,6} -10% Si)	4,0
	TiB + 40% Ti ₅ Si ₃ + 20% Al	10,4
	TiB + 50% Ti ₅ Si ₃ + 20% Al	13,0

лическую связку. В этом варианте были синтезированы две композиции расчетных составов TiB + 50% Ti₅Si₃ + 20% Al и TiB + 40% Ti₅Si₃ + 20% Al. В обоих случаях рабочий слой не сваривался с остальными функциональными слоями. Низкая технологичность продуктов синтеза системы Ti - 12% В - Al - Si на основе сплава TiB - 35% Ti, по-нашему мнению, обусловлена взаимодействием алюминия и кремния с избыточным титаном и образованием малопластичных алюминидов и силицидов титана. В результате продукты синтеза представляют собой композит на основе боридов титана без металлической связки, который имеет низкие технологические свойства как при СВС-прессовании, так и при механической обработке заготовок.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований влияния составов многокомпонентных материалов системы Ti - В на технологические свойства СВС-прессованных катодов для нанесения вакуумно-дуговых покрытий показали следующее. Композиции на основе диборида или моноборида титана имеют очень высокую хрупкость и в них уже при охлаждении синтезированных заготовок образуются макротрещины. Для получения бездефектных заготовок и катодов шихта рабочего слоя должна состояться из расчета достаточного содержания в продуктах СВС титановой связки. В системе Ti - В - Al расчетная массовая концентрация свободного титана должна составлять не менее 35%; в системе Ti - В - Si – не менее 10%. При этом максимальное содержание алюминия и кремния в этих системах составляет примерно 23 и 15% соответственно. Система Ti - В - Al - Si исследованных составов является нетехнологичной как при СВС-прессовании многослойных заготовок, так и при их механической обработке. В целом с точки зрения получения многокомпонентных катодных материалов система Ti - В характеризуется более низкими технологическими свойствами по сравнению с системой Ti - С на основе нестехиометрического карбида титана TiC_{0,5}.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. Государственный контракт № 14.740.11.0473.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барвинок В.А., Богданович В.И. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. М.: Машиностроение, 1999. 309 с.
2. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов / А.П. Амосов, И.П. Боровинская, А.Г. Мерджанов. М.: Машиностроение-1, 2007. 567 с.
3. Моделирование процесса прессования порошковых материалов в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / А.Ф. Федотов, А.П. Амосов, В.П. Радченко. М.: Машиностроение-1, 2005. 282 с.
4. Влияние технологических параметров СВС-компактирования на состав, структуру и свойства функционально градиентных мишеней на основе TiB₂ и TiN / Е.А. Левашов, Д.В. Ларихин, Д.В. Штанский и др. // Цветные металлы. 2002. № 5. С. 49-55.
5. Нанесение эрозионно стойких нанопокровов системы Ti-Si-B, содержащих max-фазу, на поверхность деталей из сплава Ti6Al4V вакуумно-плазменным методом с сепарацией плазмы от капельной фазы / В.А. Шулов, А.Г. Пайкин, А.Д. Теряев и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 12. С. 23-25.
6. Нанокристаллические и нанокompозитные покрытия, структура, свойства / В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, Н.А. Азаренков и др. // Физическая инженерия поверхности. 2007. Т. 5. № 1-2. С. 4-27.
7. Левашов Е.А., Штанский Д.В. Многофункциональные наноструктурированные пленки // Успехи химии. 2007. Т. 76. № 5. С. 501-509.
8. Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2008. № 2. С. 119-130.
9. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий / А.Д. Погребняк, А.П. Шпак, Н.А. Азаренков, В.М. Береснев // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. № 1. С. 35-64.
10. СВС-прессование многокомпонентных катодов на основе тугоплавких соединений титана для электродуговых испарителей / А.П. Амосов, А.А. Ермошкин, А.Ф.

- Федотов* // Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования (Металлодеформ - 2009): Труды 3-й Международной научно-технической конференции (3-5 июня 2009 г., Самара). Т. 2. Самара: СГАУ-ВФ ИМЕТ, 2009. С. 12-15.
11. Получение многокомпонентных СВС-прессованных катодов на основе тугоплавких соединений титана для нанесения вакуумно-дуговых покрытий / *А.П. Амосов, Е.И. Латухин, А.Ф. Федотов, А.А. Ермошкин, С.И. Алтухов* // Известия ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2011. №1.
12. Вакуумно-дуговое осаждение наноструктурных Ti-Si-N покрытий из многокомпонентной плазмы / *В.М. Шулаев, А.А. Андреев, В.А. Столбовой и др.* // Физическая инженерия поверхности. 2008. Т. 6. № 1-2. С. 105-113.

AN INVESTIGATION INTO THE SHS-COMPACTING OF MULTICOMPONENT TARGETS BASED ON Ti - B FOR CATHODIC ARC DEPOSITION

© 2011 S.I. Altukhov, A.A. Ermoshkin, K.S. Smetanin,
A.F. Fedotov, V.N. Lavro, E.I. Latukhin, A.P. Amosov

Samara State Technical University

The effect of aluminum and silicon-containing compounds of titanium-boron system on technological properties of SHS-compacted targets for arc-PVD has been investigated. The charge mixture of the working layer should be prepared based upon the sufficient content of titanium matrix in the synthesis products to obtain defect-free workpieces and targets. Estimated mass concentration of free titanium in the Ti - B - Al and Ti - B - Si systems should be at least 35% and 10% respectively. All the studied compositions of the Ti - B - Al - Si system are non-manufacturable both at SHS compacting of multilayer workpieces and at the machining.

Key words: SHS compacting, multicomponent targets, cathodic arc deposition (arc-PVD).

Sergey Altukhov, Graduate Student at the Metals Science, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department.

E-mail: altuhov_serg@mail.ru

Andrey Ermoshkin, Graduate Student, Assistance Lecturer at the Metals Science, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department. E-mail: ermandr@ya.ru

Kirill Smetanin, Graduate Student at the Metals Science, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department.

E-mail: smks@inbox.ru

Alexander Fedotov, Doctor of Technics, Professor at the Mechanics Department. E-mail: a.fedotov50@mail.ru

Viktor Lavro, Associated Professor at the Metals Science, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department.

E-mail: lavro7@mail.ru

Evgeny Latukhin, Candidate of Science, Associated Professor at the Metals Science, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department. E-mail: evgelat@yandex.ru

Alexander Amosov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head at the Metals Science, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department. E-mail: mvm@samgtu.ru