



УДК 621.793.7

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЧАСТИЦАХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ В УСЛОВИЯХ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова, А. Ю. Туник, А. П. Мурашов

Представлены результаты исследования композиционных порошков, полученных способом СВС и содержащих в своем составе металлический компонент (Ni, NiAl, NiCrBSi), а также включения тугоплавких соединений (карбидов титана, хрома, силицида титана, оксида алюминия). Исследованы физико-химические процессы, происходящие в частицах этих композиционных порошков в ходе их нагревания и движения в высокотемпературном газовом потоке.

Results of investigation of composite powders produced by the CVC method and containing a metallic component (Ni, NiAl, NiCrBSi), as well as inclusions of refractory compounds (titanium carbides, chromium, titanium silicide, aluminium oxide) in their composition, are presented. Physical-chemical processes proceeding in particles of these composite powders during heating and movement in high-temperature gas flow have been investigated.

Ключевые слова: композиционные порошки; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; плазменное напыление; морфология; структура; фазовый состав

Защита конструкционных материалов от износа при высоких температурах является одной из важных проблем современного материаловедения. Наиболее полно удовлетворить комплекс требований к защитному покрытию можно путем создания композиционных покрытий, состоящих из нескольких компонентов. Возможностями получения композиционных порошков (КП) с широким диапазоном составов характеризуется способ самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) — процесс перемещения волны химической реакции по смеси реагентов с образованием твердых конечных продуктов. Процесс СВС представляет собой режим протекания мощной экзотермической реакции (реакции горения), в которой тепловыделение локализовано в слое и передается от пласта к пласту в результате теплопередачи [1–5]. Химическое превращение при процессе СВС сосредоточено в высокотемпературной зоне, возникающей вследствие саморазогревания за счет высокой экзотермичности процесса синтеза и перемещающейся в объеме со значительной линейной скоростью благодаря теплопередаче от горячих слоев к холодным. Диапазон физических параметров, характеризующих процесс, чрезвычайно велик (температура 300... 4000 °С, линейная скорость 0,1... 30 см/с, скорость нагревания вещества $1 \cdot 10^2$... $1 \cdot 10^6$ град/с) [4].

Процесс СВС, характеризующийся незначительными энергозатратами, простотой оборудова-

ния, высокой скоростью, чистотой продукта, привлекает к себе внимание специалистов. В первую очередь это связано с возможностью получения высококачественных порошков тугоплавких соединений (боридов, карбидов, нитридов, силицидов и др.), служащих основой для производства жаростойких, сверхтвердых, сверхпроводящих, полупроводниковых, изоляционных и других видов современных материалов. По мере развития теоретического и экспериментального изучения СВС открывались все новые возможности этого процесса, и сейчас он приобрел черты самостоятельной научно-технической области.

К областям техники, где процесс СВС нашел практическое применение, относится технология нанесения покрытий способами напыления и наплавки в таких случаях [6–10]:

использование разных исходных порошков, в том числе композиционных, полученных с помощью СВС и имеющих определенные преимущества в сравнении с изготовленными другими способами (состав, структура, стоимость и прочее);

совмещение процессов нанесения покрытий и синтеза материала покрытия способом СВС, использование теплоты реакции для повышения качества формируемого слоя.

Для газотермического напыления (ГТН) представляют интерес многие порошки, изготавливаемые способом СВС: нитриды титана, тантала, циркония, гафния и др.; карбиды титана, вольфрама, титана-хрома и др.; бориды титана, титана-хрома; силициды и сульфиды молибдена, разнообразные оксиды. Кроме того, специфика СВС обеспечивает воз-



возможность получения ряда композиционных порошков, среди которых следует отметить такие композиции как карбид хрома–оксид алюминия, карбид титана–феррохром, карбид хрома–нихром. Покрытия из этих порошков отличаются высокой износостойкостью и жаро- и термостойкостью [7, 11, 12].

Тонкое смешивание компонентов в исходных частицах обеспечивает однородность их распределения в объеме покрытия. Примерами таких композиций могут служить Ti_5Si_3-TiN , $Cr_5Si_3-Cr_3C_2$, $Al-TiC$, $TiC-TiSi_2$, $MoSi_2-SiC$ [7, 10–13]. Большие возможности управления составом матрицы и включений при СВС позволяют создавать новые материалы для ГТН с заданным комплексом свойств.

Другой аспект использования способа СВС в технологии ГТН заключается в объединении процессов напыления и синтеза напыляемого материала. Впервые эта идея реализована фирмой «Метко» при использовании композиции никель–алюминий в виде частиц алюминия с никелевой оболочкой [7]. Возникновение в результате экзотермической реакции внутреннего источника тепла позволило повысить термическую активность напыляемых частиц, увеличить прочность связи покрытия с основой.

К композициям, где взаимодействие компонентов протекает с экзотермическим эффектом и может проходить в режиме СВС, относится сочетание металлов (*d*-элементов IV, V и VI групп) с неметаллическими тугоплавкими соединениями (SiC , Si_3N_4 , B_4C , BN). Продукты взаимодействия (смеси карбидов и боридов, карбидов и силицидов, силицидов и нитридов, боридов и нитридов) отличаются комплексом полезных служебных свойств, прежде всего стойкостью против износа и коррозии.

Данные об использовании порошков СВС в технологии ГТН покрытий и получения покрытий путем объединения процессов напыления и синтеза напыляемого материала представлены в работах [7, 14–22]. Применение порошков СВС для ГТН создает возможность формирования покрытий из композиций тугоплавкое соединение–металлическая связка без использования механических смесей и плакированных порошков. При этом обеспечивается равномерное распределение компонентов в объеме покрытия, в сравнении с механической смесью, из-за наличия обоих компонентов в объеме каждой частицы.

Физико-химические процессы, протекающие в объеме частиц КП в период его нагрева и движения в высокотемпературном газовом потоке, имеют важное значение для формирования покрытия. В условиях напыления гомогенных материалов межфазной границей является поверхность частицы. Газовая среда и физико-химические процессы ограничиваются в основном взаимодействием материала частицы с окружающей средой (окислением, азотированием, восстановлением и т. п.). В КП гетеро-

генность состава материала частиц обуславливает возникновение новых межфазных поверхностей раздела в объеме частицы, вследствие чего возникает возможность протекания дополнительных физико-химических процессов.

При этом можно предположить прохождение следующих процессов [23]:

в случае появления расплава одного из компонентов — смачивание им поверхности других компонентов и в зависимости от угла смачивания — растекание или сворачивание в капли массы образовавшегося расплава;

взаимодействие расплавов компонентов частицы с образованием новых фаз;

реакционное взаимодействие компонентов с синтезом новых соединений, сопровождаемое соответствующим тепловым эффектом протекания реакции. Кроме того, сохраняется возможность взаимодействия с внешней средой — компонентами газового потока и окружающей атмосферой.

В настоящей работе исследованы структура, фазовый состав и технологические свойства КП, полученных способом СВС и содержащих в своем составе металлическую матрицу (Ni , $NiAl$, $NiCrBSi$), а также включения тугоплавких соединений: карбидов (титана, хрома), силицида титана, оксида алюминия*. При получении порошков способом СВС горение шихты смеси исходных компонентов проходило в реакторах вместимостью 30 л в инертном газе. Продукт СВС представлял собой спекшуюся бесформенную массу, подвергаемую механическому измельчению и классификации на виброситах для выделения частиц нужного размера (40... 100 мкм). Кроме того, изучены физико-химические процессы, происходящие в частицах КП в период их нагрева и движения в высокотемпературном газовом потоке.

В качестве объектов исследования выбраны композиции на основе $TiSi_2-Al_2O_3$. В композиции ди-силицид титана–оксид алюминия соотношение твердости компонентов составляет 0,35... 0,36, что соответствует требованиям к эрозионно-стойким материалам [24]. Высокая стойкость компонентов против окисления при 800... 1000 °С позволяет применять такой материал в качестве жаростойкого.

С целью получения покрытий с заданными свойствами использовали введение в состав КП на основе $TiSi_2-Al_2O_3$ следующих дополнительных компонентов: никеля для улучшения пластичности покрытия; $NiAl$ для повышения жаростойкости; $NiCrBSi$ и TiC для усиления стойкости против изнашивания при значениях температуры 600 °С; Cr_3C_2 для повышения стойкости против износа при значениях температуры до 800... 900 °С.

В табл. 1 приведен состав композиционных порошков, в табл. 2 — основные физические характеристики КП и их компонентов. Содержание ме-

* Порошки изготовлены в государственном научно-техническом центре «Дельта», г. Тбилиси (Грузия) под руководством д-ра техн. наук О. Окросцваридзе.



Таблица 1. Состав КП

Тип композиции	Массовая/объемная доля компонентов, %						
	TiSi ₂	Al ₂ O ₃	NiCrBSi	Cr ₃ C ₂	Ni	TiC	NiAl
TiSi ₂ -Al ₂ O ₃ -NiCrBSi	35/43	20/28,2	45/28,8	-	-	-	-
TiSi ₂ -Al ₂ O ₃ -Cr ₃ C ₂ -Ni	37/39,4	40/49	-	3/1,9	20/9,7	-	-
TiSi ₂ -Al ₂ O ₃ -TiC-Cr ₃ C ₂ -NiAl	25/26,9	34/42	-	10/6,5	-	15/13,1	16/11,5

таллической связки в большинстве случаев составляет 10... 11, а в композиции с NiCrBSi — 28 об. %.

Компоненты КП значительно различаются по уровню температуры плавления (600... 1000 °С), а также имеют разную плотность. Усредненное по массе значение плотности исследуемых порошков составляет 4,3... 4,9 г/см³, что в 1,22... 1,42 раза превышает плотность основного тугоплавкого компонента Al₂O₃. В связи с этим можно предположить, что плавление Al₂O₃ в составе частиц КП при плазменном напылении может происходить при меньших значениях энергии высокотемпературного газового потока, чем обычно, из-за снижения скорости движения частиц в струе и продолжительности процесса нагрева [25].

В ходе исследований применили комплексную методику, включающую металлографию (оптический микроскоп «Неофот-32» с пристройкой для цифрового фотографирования); микродюрометрию (микротвердомер М-400 «ЛЕСО» с автоматической системой нагружения); растровую электронную микроскопию (сканирующий электронный микроскоп JSM-840). Рентгеноструктурный фазовый анализ (РСФА) проводили на дифрактометре ДРОН-УМ1 в монохроматизированном излучении CuK_α и CoK_α.

Технологические свойства порошков (текучести и насыпной плотности) определяли согласно ГОСТ 20899-75 и ГОСТ 19440-74.

Исследование морфологии и структуры частиц исходных порошков, полученных способом СВС, показало (рис. 1), что они имеют неправильную

Таблица 2. Основные физические характеристики КП и их компонентов

Материал	T _{пл} , °С	Плотность, г/см ³
TiSi ₂ -Al ₂ O ₃ ** - NiCrBSi*	1000... 2050	~4,935***
TiSi ₂ -Al ₂ O ₃ ** - Cr ₃ C ₂ -Ni*	1455... 2050	4,286***
TiSi ₂ -Al ₂ O ₃ -TiC** - Cr ₃ C ₂ -NiAl*	1638... 2780	4,32***
Al ₂ O ₃	2050	3,50
TiSi ₂	1500	4,02
Cr ₃ C ₂	1830	6,68
TiC	2780	4,92
Ni	1455	8,90
NiAl	1638	6,02
NiCrBSi	~1000	~7,70

* Наиболее легкоплавкий компонент. ** Наиболее тугоплавкий компонент. *** Средняя плотность частицы КП.

осколочную форму и гетерогенную внутреннюю структуру, представляющую собой конгломерат отдельных фазовых составляющих. Фазовый состав порошков СВС незначительно отличается от расчетного, в них обнаружены следы оксидов и/или непрореагировавших остатков исходной шихты (табл.3). Все порошки отличаются текучестью на уровне 25... 45 с/50 г.

Для анализа характера физико-химических процессов, происходящих в условиях ГТН КП, производили отбор в водяную ванну проб порошков, про-

Таблица 3. Характеристика КП

Состав порошка	Расчетный фазовый состав, мас. %	Насыпная плотность, г/см ³	Результаты РСФА*	
			исходных порошков	порошков, уловленных после плазменного напыления
TiSi ₂ -Al ₂ O ₃ -NiCrBSi	~35 TiSi ₂ ~20 Al ₂ O ₃ ~45 NiCrBSi	2,61	Ni ₁₆ Cr ₆ Si, Ni, TiSi ₂ , α-Al ₂ O ₃ , следы В ₂ O ₃	Ni, Ni ₁₆ Ti ₆ Si ₇ , γ-Al ₂ O ₃ , α-Al ₂ O ₃ , Ti ₅ Si ₃ , TiSi ₂ , NiCr ₂ O ₄
TiSi ₂ -Al ₂ O ₃ -Cr ₃ C ₂ -Ni	~43 TiSi ₂ ~36 Al ₂ O ₃ ~5 Cr ₃ C ₂ ~16 Ni	3,09	TiSi ₂ , α-Al ₂ O ₃ , Ni, Cr ₃ C ₂ , следы Si	γ-Al ₂ O ₃ , α-Al ₂ O ₃ , TiSi, Ni, Cr ₃ C ₂ , Cr ₇ C ₃ , Ni ₃ Ti ₂ Si, следы NiO
TiSi ₂ -Al ₂ O ₃ -TiC-Cr ₃ C ₂ -NiAl	~17 TiSi ₂ ~25 Al ₂ O ₃ ~28 Cr ₃ C ₂ ~10 TiC ~20 NiAl	2,42	α-Al ₂ O ₃ , Cr ₃ C ₂ , TiSi ₂ , TiC, NiAl, Ni ₃ Al, следы Cr ₇ C ₃	γ-Al ₂ O ₃ , α-Al ₂ O ₃ , NiAl, Cr ₇ C ₃ , TiSi, TiC, следы Ni ₂ Al ₁₈ O ₂₉ , Ti ₂ Cr ₂ O ₇

* Фазы расположены в порядке убывания интенсивности рентгеновских пиков.



шедших зону нагрева и ускорения. Поверхность воды находилась на расстоянии 200 мм от среза сопла. Напыление осуществляли на плазменной установке УПУ-8М. Технологические режимы напыления соответствовали таковым формирования плазменных покрытий: $I = 450...500$ А; $U = 40...55$ В; расход плазмообразующего газа: аргона — 27, азота — 3,5 л/мин, дистанция напыления $L = 120...200$ мм, размер частиц 80...40 мкм.

Порошок $TiSi_2-Al_2O_3-NiCrBSi$ (рис. 2, а-в), уловленный после плазменного напыления, состоит из частиц двух типов — неправильной 1 и сферической 2, 3 формы. Поверхность частиц неправильной формы покрыта мелкими каплями расплава, образующимися в результате частичного сворачивания пленки расплава на поверхности частицы (рис. 2, б) и гладкими участками. Это является

следствием межфазного взаимодействия в объеме частицы таких компонентов, как $TiSi_2$ и Al_2O_3 , на стадии плавления $TiSi_2$ при сохранении Al_2O_3 в твердом состоянии.

Сферические 2 и округлые частицы в форме двух спаянных полусфер 3, согласно данным анализа, представляют собой наиболее легкоплавкий (~ 1000 °С) компонент — сплав $NiCrBSi$, выделяющийся из объема композиционной частицы. В случае частичного легирования его при взаимодействии с $TiSi_2$ происходит превращение сферы в фигуру, состоящую из двух сферических образований, соединенных между собой («матрешка»), с разделением объемов, содержащих разное количество титана.

Таким образом, в процессе нагрева частиц в плазменном потоке в основном происходит разделение компонентов исходных композиций на две

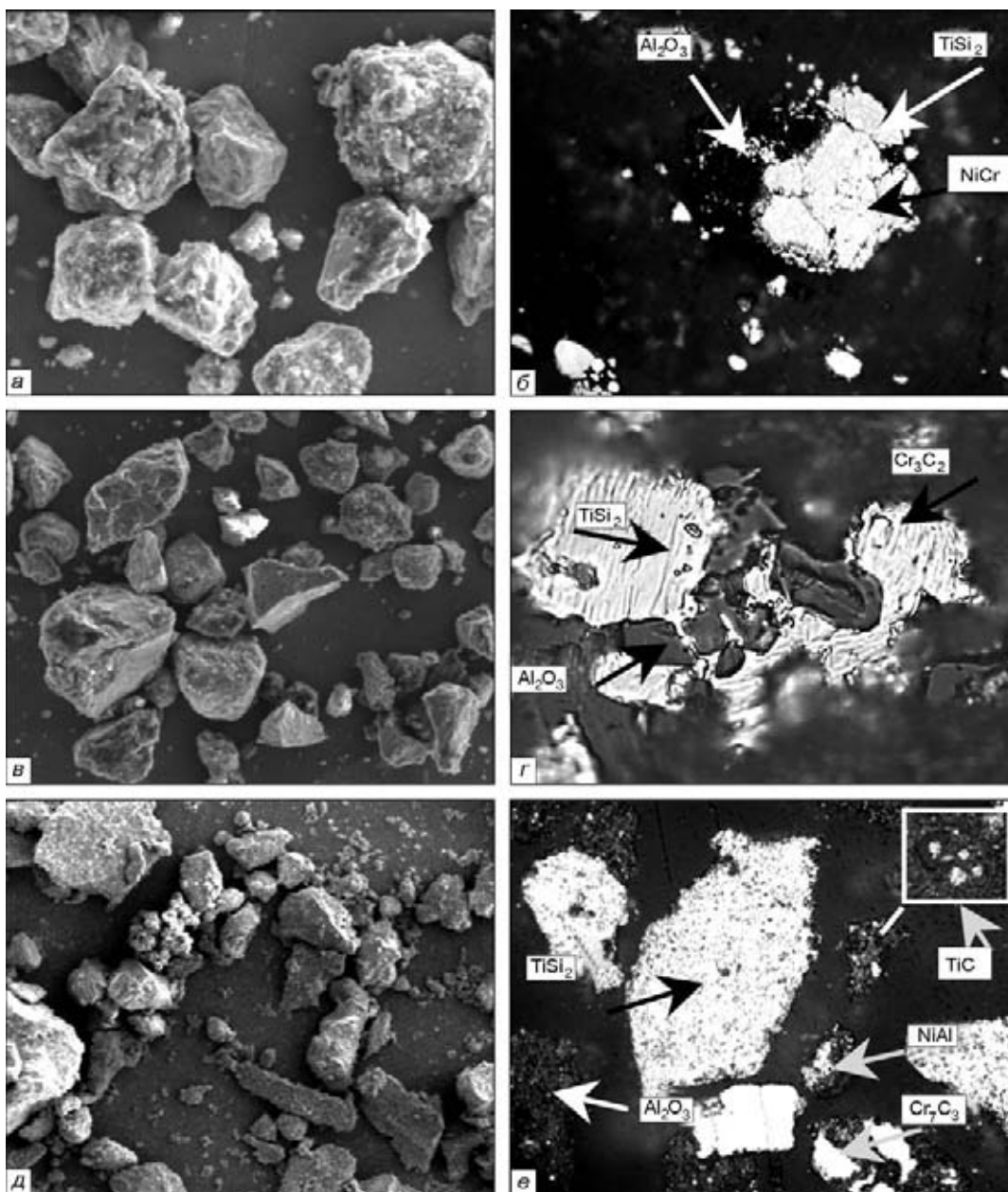


Рис. 1. Внешний вид (а, в, д) и микроструктура (б, з, е) исходных частиц КП: а, в — $TiSi_2-Al_2O_3-NiCrBSi$; в, з — $TiSi_2-Al_2O_3-Cr_3C_2-Ni$; д, е — $TiSi_2-Al_2O_3-TiC-Cr_3C_2-NiAl$; а, в, д — $\times 400$; б, з — $\times 1000$; е — $\times 800$

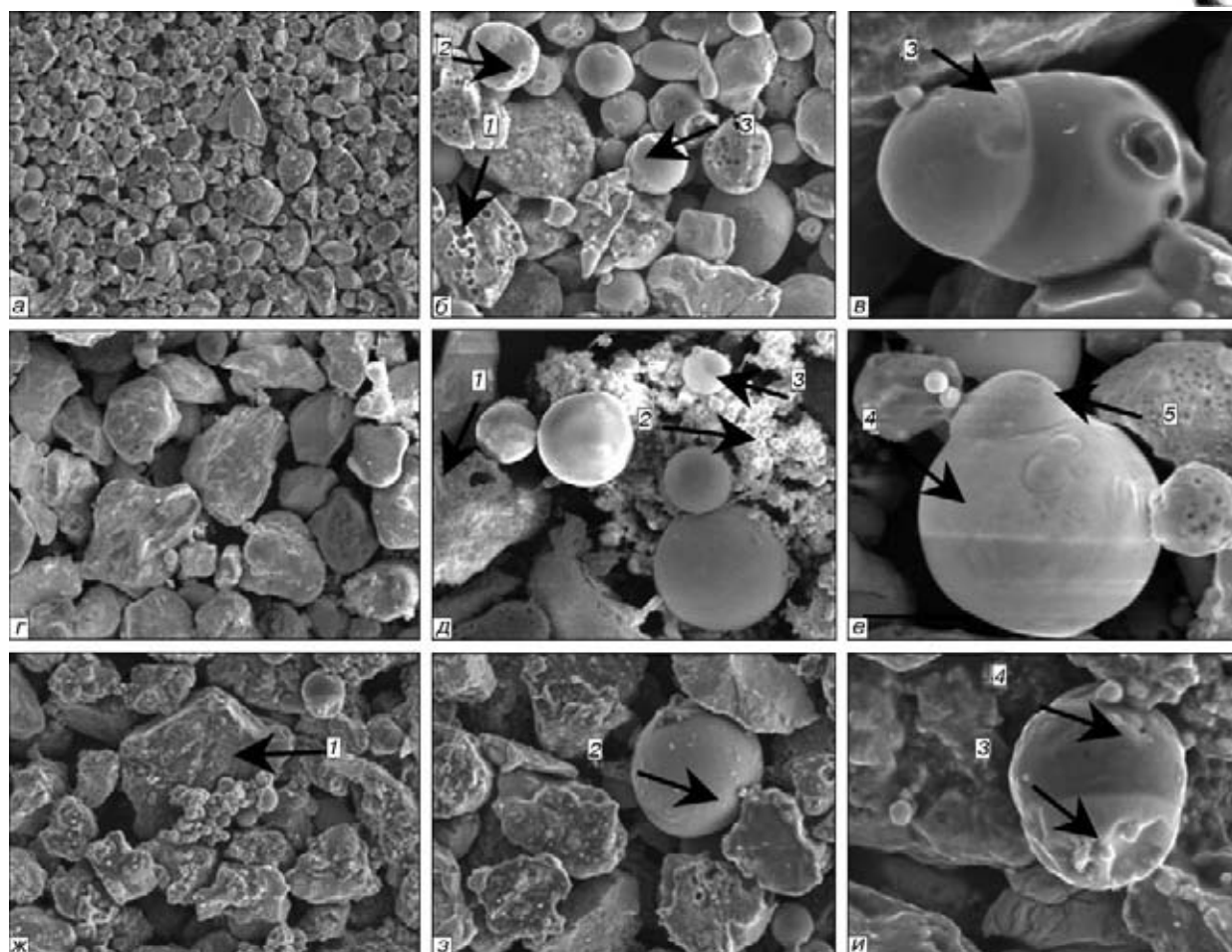


Рис. 2. Внешний вид частиц композиционных порошков, уловленных из плазменного потока: *a-в* — $\text{TiSi}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-NiCrBSi}$; *г-е* — $\text{TiSi}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$; *ж-и* — $\text{TiSi}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiC-Cr}_3\text{C}_2\text{-NiAl}$; *a* — $\times 200$; *б* — $\times 800$; *в, е* — $\times 2000$; *г, ж* — $\times 400$; *д, з* — $\times 950$; *и* — $\times 1800$

группы: $\text{TiSi}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ с локальным плавлением TiSi_2 и NiCrBSi , достигшим полного плавления и сфероидизации.

При исследовании частиц порошка $\text{TiSi}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ (рис. 2, *г-е*) обнаружено, что наряду с частицами, имеющими признаки локального оплавления поверхности 1, в уловленном порошке присутствует значительное количество сфероидизированных частичек, прошедших фазу полного плавления. Они имеют форму как правильных сфер, так и «матрешек» 3. В этом случае происходит межфазное взаимодействие в двух парах компонентов $\text{TiSi}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$. Наличие титана способствует улучшению смачиваемости поверхности Al_2O_3 , а растекание никеля по поверхности Cr_3C_2 происходит еще сильнее. Краевой угол смачивания Cr_3C_2 расплавом никеля равняется нулю и взаимодействие никеля и Cr_3C_2 протекает очень быстро с образованием эвтектики. «Матрешки» содержат продукт обоих типов взаимодействия. В соответствии с данными анализа, «матрешка» состоит из $\text{TiSi}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 4 и $\text{Ni-Cr}_3\text{C}_2$ 5.

Сферические проплавленные частицы представляют собой результат взаимодействия никеля и Cr_3C_2 , частицы с признаками локального плавления в основном состоят из TiSi_2 и Al_2O_3 .

Исследуемый порошок $\text{TiSi}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiC-Cr}_3\text{C}_2\text{-NiAl}$ содержит наибольшее количество тугоплавких компонентов (42 об. % Al_2O_3 , 13 об. % TiC) в сочетании с низкой плотностью — $4,32 \text{ г/см}^3$ (табл. 1, 2). Это затрудняет обеспечение достаточного прогрета частиц в условиях плазменного напыления.

Большинство уловленных из плазменного потока частиц (рис. 2, *ж-з*) имеют неправильную форму с различной степенью локального оплавления поверхности 1. Сферические частицы 2, согласно результатам анализа, являются в основном продуктом взаимодействия NiAl и Cr_3C_2 . «Матрешки» совмещают в своём объеме продукты взаимодействия $\text{TiSi}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 3 и $\text{NiAl-Cr}_3\text{C}_2\text{-TiC}$ 4.

Анализ изменения формы и состава частиц КП в результате его прохождения через высокотемпературный плазменный поток позволяет сделать вывод о том, что основным видом протекающих при этом физико-химических процессов является межфазное взаимодействие расплавов их компонентов с твердой поверхностью (или расплавом) другого компонента. Причина этих изменений заключается в протекании процессов межфазного взаимодействия между компонентами частиц, значительно отличающихся по температуре плавления ($600 \dots 1000 \text{ }^\circ\text{C}$) и плотности.



Процессы, приводящие к изменению фазового состава порошков в результате их нагрева в потоке плазменной струи и закалки в водяной ванне, сводятся к следующему:

во всех исследуемых порошках происходит аллотропическое превращение $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, приводящее к появлению новой γ -фазы;

в порошках, содержащих $\text{TiSi}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ и более легкоплавкие составляющие (никель, NiAl или NiCrBSi), происходит разделение компонентов исходных композиций на две группы: $\text{TiSi}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ с локальным плавлением TiSi_2 и сплав никеля, достигший полного плавления и сфероидизации;

дисилицид титана в результате частичной потери кремния превращается в нижние силициды TiSi и Ti_5Si_3 ;

в порошках, содержащих NiAl или сплав NiCrBSi , в результате окисления образуются комплексные оксиды NiCr_2O_4 и $\text{Ni}_2\text{Al}_{18}\text{O}_{29}$;

при окислении карбида хрома Cr_3C_2 из-за выгорания углерода в покрытиях увеличивается количество нижнего карбида хрома Cr_7C_3 ;

протекают процессы межфазного взаимодействия между компонентами покрытия с образованием новых фаз и их последующим окислением с образованием $\text{Ti}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, $\text{Ni}_3\text{Ti}_2\text{Si}$, $\text{Ni}_{16}\text{Ti}_6\text{Si}_7$ и др.

Результаты исследования физико-химических процессов, протекающих в частицах КП в условиях плазменного напыления, использовались для оптимизации технологических параметров получения покрытий.

Коллектив авторов выражает благодарность Научно-техническому центру в Украине за финансовую поддержку проекта G046, в рамках которого выполнена настоящая работа.

- Итин И. И., Найбороденко Ю. С. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. — Томск, 1989. — 214 с.
- Мержанов А. Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: двадцать лет поисков и находок. — Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1989. — 93 с.
- Боровинская И. П. Химические основы технологии СВС — продуктов // Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: Сб. ст. — Томск, 1991. — С. 33–55.
- Смирнов И. И., Бендерская Л. А. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез. — Красноярск, 1990. — 80 с.
- Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардаговская // Справочник. — Киев: Наук. думка, — 1987. — 544 с.
- Шаривкер С. Ю., Мержанов А. Г. СВС порошки и их технологическая переработка. — Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 2000. — 123 с.
- Borisov Yu., Borisova A. Application of self — propagating high temperature synthesis in thermal spraying technology // Proc. of NTSC'93 (Anaheim, USA, June 7–11, 1993). — Anaheim, 1993. — P. 139–144.
- Юхвид В. И. СВС-металлургия: литье и наплавка // Технология. Сер. Оборудование, материалы, процессы. — М.: Металлургия, 1988. — С. 57–64.

- Borisov Yu., Borisova A., Shvedova L. Transition metal — nonmetallic refractory compound composite powders for thermal spraying // Proc. of ITSC'86 (Montreal, Canada, Sept. 8–12, 1986). — Montreal, 1986. — P. 323–330.
- Self propagating high temperature synthesis (SHS) of thermal spray powders / R. W. Smith, M. Mohanty, E. Shtessel, A. Verstak // Proc. of ITSC'95 (Kobe, Japan, May 22–26, 1995). — Kobe, 1995. — P. 1121–1126.
- $\text{NiCr-Cr}_7\text{C}_3$ and NiCr-TiC -high wear resistant coatings for protective applications in steam turbines / E. Lugscheider, P. Remer, Yu. Borisov et al. // Ibid. — Kobe, 1995. — P. 235–240.
- Titanium carbide in wear resistant coatings / P. Vitiaz, A. Verstak, T. Azarova et al. // Proc. of NTSC'96 (Cincinnati, USA, Oct. 7–11, 1996). — Cincinnati, 1996. — P. 1969–176.
- Low pressure plasma sprayed SHS $\text{MoSi}_2\text{-SiC}$ composite coatings / P. Knight, R. Smith, M. Mohanty, E. Shtessel // Proc. of NTSC'95 (Houston, USA, Sept. 11–15, 1995). — Houston, 1995. — P. 743–748.
- Веприк Б. А., Курьлев М. В., Коренков В. А. Структура покрытий из СВС композита $\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$ // Сверхтвердые и композиционные материалы и покрытия, их применение. — 1991. — С. 57–59.
- Тунник А. Ю. Газотермические покрытия на основе композиционных материалов для работы в условиях сухого трения и повышенных температур // Автомат. сварка. — 2002. — № 10. — С. 21–24.
- СВС дисперсных материалов Ti-Al и защитные покрытия на их основе / Б. М. Вольпе, В. В. Евстигнеев, И. В. Милюкова и др. // Физика и химия обработки материалов. — 1996. — № 2. — С. 73–79.
- Структура и свойства газотермических покрытий на основе карбида титана, оксидов титана и хрома, содержащих твердые смазки / А. Л. Борисова, Л. И. Адеева, А. Ю. Тунник и др. // Автомат. сварка. — 1999. — № 1. — С. 22–27.
- СВС-порошки для газотермических покрытий, работающих в условиях комплексного воздействия коррозии и износа / А. Ф. Ильюченко, А. В. Беляев, Т. Л. Талако и др. // Порошк. металлургия. — 2000. — Вып. 23. — С. 54–57.
- Coherences between structure and properties of TiC containing thermal spraying coatings / T. Azarova, P. Vitiaz, B. Wielage et al. // Proc. of the ITSC. — 2002. — P. 96–101.
- Исследование плазменных покрытий на основе никеля и железа, содержащих добавки термореагирующих композиционных порошков Ti/SiC / А. Л. Борисова, М. Л. Князь, А. Ю. Тунник и др. // Пробл. спец. электротехнологии. — 1999. — № 1. — С. 45–63.
- Борисов Ю. С., Борисова А. Л., Адеева Л. И. Композиционные плазменные покрытия системы Ti-SiC // Там же. — 1995. — № 3. — С. 62–70.
- Газотермические покрытия из композиционных порошков Ti-BN / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова, Л. С. Шведова и др. // Труды 11 Всесоюз. совещания по жаростойким покрытиям (Тула, 31 мая – 2 июня 1983 г.). — Л.: Наука, 1985. — С. 36–41.
- Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик, Ю. С. Борисов, А. С. Мунухин, М. Д. Никитин. — Л.: Машиностроение, 1985. — 197 с.
- Федорченко И. М., Пугина М. И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. — Киев: Наук. думка, 1980. — 404 с.
- Борисов Ю. С., Борисова А. Л. Плазменные порошковые покрытия. — Киев: Техника, 1986. — 221 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 16.01.2007