

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-61-71

УДК 55.09.43

А. С. ФЕДОСЕНКО, канд. техн. наук, доц.

Ф. Г. ЛОВШЕНКО, д-р техн. наук, проф.

В. А. БЕЛЯКОВИЧ

И. К. АНДРЕЕВ

А. С. ОЛЕНЦЕВИЧ

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПОРОШКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ СПОСОБОМ МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ, И ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ НИХ

Аннотация

Приведены результаты исследований, направленных на разработку композиционных порошков на керамической основе, изготавливаемых с применением способа механического легирования, а также технология их подготовки для высокопроизводительного напыления плазменных покрытий. Представлены результаты исследований характеристик порошков, их фазового состава и морфологии. Рассмотрены результаты изучения структуры и свойства покрытий.

Ключевые слова:

реакционное механическое легирование, плазменное напыление, композиционный порошок, износостойкость, керамические покрытия, металлокерамика.

Для цитирования:

Металлокерамические порошки, полученные способом механического легирования, и плазменные покрытия из них / А. С. Федосенко, Ф. Г. Ловшенко, В. А. Белякович, И. К. Андреев, А. С. Оленцевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 61–71.

Введение

Нанесение керамических плазменных покрытий – эффективный способ защиты рабочих поверхностей деталей машин и оборудования от воздействия высоких температур, агрессивных веществ, абразивного и прочих видов износа.

Среди керамических материалов наибольшее распространение получили порошки оксида алюминия с добавкой оксида титана или без него. Они используются для формирования газотермических покрытий, отличающихся высокой твердостью, износостойкостью, а также низкой теплопроводностью. Существенными недостатками таких покрытий являются невысокая прочность сцепления с подложкой и низкая пластичность. Как правило, требуемое значение прочности сцепления достигается

использованием промежуточных слоев, в качестве которых чаще всего используют материалы системы «никель – алюминий». При этом склонность самих покрытий к образованию трещин, растрескиванию и расслоению сохраняется.

Наиболее перспективным типом материалов для получения высокостойких покрытий, способных выдерживать экстремальные условия работы, является композиционная металлокерамика. Введение металлической добавки способствует увеличению вязкости, устойчивости к тепловым ударам и деформациям, а керамическая основа обеспечивает высокие твердость и износостойкость.

Многолетние исследования показали, что металлокерамические порошки могут быть с успехом получены способом, основанным на реакционном ме-

ханическом легировании. Он хорошо изучен в [1] и демонстрирует уникальные результаты на различных группах материалов.

Большинство выпускаемых керамических и металлокерамических порошков имеют свои недостатки, среди которых следует выделить низкую сыпучесть. Это требует дополнительных приемов при подготовке порошка перед напылением, а также корректировки режимов работы оборудования.

При дозировании и подаче керамических порошков в плазменную струю часто приходится сталкиваться с трудностями, связанными с зависанием в бункере питателя, налипанием на его стенки и поверхности воздушно-порошкового тракта. Это существенно затрудняет стабильную подачу материала, ухудшая качество покрытий и снижая эффективность процесса.

В некоторой степени данные недостатки устраняются корректировкой режима дозирования порошка в сторону уменьшения его расхода в единицу времени, однако это значительно снижает производительность процесса и увеличивает затраты электроэнергии. Как отмечают исследователи, на разогрев и разгон частиц напыляемого материала затрачивается не более 8 % всей энергии, потребляемой плазмотроном [2]. Определенное увеличение эффективности процесса может быть достигнуто использованием нескольких подающих трубок [3, 4], однако это существенно усложняет конструкцию оборудования и процесс его обслуживания.

Таким образом, в настоящее время остается актуальным вопрос повышения эффективности процесса плазменного напыления покрытий из порошков на основе керамики. Разработка технологии, позволяющей увеличить производительность процесса напыления керамических порошков и снизить энергопотребление процесса, позволит расширить область применения таких покрытий, сделает их использование рента-

бельным.

Цель исследования – разработка эффективного способа получения композиционных порошков на основе оксидной керамики, а также формирование плазменных покрытий из них.

Материалы, оборудование, приборы и методика исследований

Исследования проводились на керамических материалах на основе оксида алюминия. В качестве основной добавки вводили оксид титана в количестве 13 %. С целью увеличения пластичности, адгезионной и когезионной прочности в композиции дополнительно вводили никель в количестве 10 %.

Для получения гомогенных композиционных порошков, в том числе содержащих никель, был применен способ реакционного механического легирования. Он позволяет получать порошки, содержащие равномерно распределенную добавку металла, количество которой не ограничено технологией получения материала.

В качестве оксида алюминия использовался порошок нормального электрокорунда $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд), оксид титана добавляли в виде соединения TiO_2 (рутил), поставщиком никеля являлся порошок марки ПНК-ОНТ2. Средний размер частиц исходных порошков составил 20, 5 и 15 мкм соответственно.

Механосинтез порошков проводили в энергонапряженной вибрационной мельнице гирационного типа, оснащенной четырьмя водоохлаждаемыми камерами общим объемом 4000 см³. Круговая частота колебания камер составляла 30 с⁻¹. В качестве рабочих тел использовали шары диаметром (9 ± 0,5) мм из закаленной стали ШХ15. Механосинтез проводили на следующих режимах: ускорение рабочих тел – 130 м·с⁻²; степень заполнения помольной камеры рабочими телами – 75 %...80 %; отношение объема рабочих тел к объему обра-

батываемой шихты – 8; продолжительность обработки – 8 ч.

Напыление плазменных покрытий осуществлялось дуговым плазмотроном, работающим на высокоэнтальпийной воздушно-пропановой газовой смеси. Порошок подавался из бункера питателя по одному воздушно-порошковому тракту на срез сопла. Расстояние от среза сопла до центральной оси подающей трубки – 5 мм. Расстояние от среза подающей трубки до плазменного потока – 5 мм. Источником питания плазмотрона являлась установка АПР 404.

Покрытие наносилось на водоохлаждаемые образцы квадратного сечения с размером стороны 20 мм, изготовленные из стали Ст3пс. Толщина стенки, на которую наносили покрытие, составляла 0,5...0,7 мм. Образец устанавливался неподвижно. Перемещение плазмотрона осуществлялось со скоростью 100 мм/с. Расстояние от среза сопла до образца составляло 120 мм. Сила тока, потребляемая плазмотроном, – 210...230 А, напряжение – 210 В.

Металлографический анализ проводился на металлографическом комплексе МКИ-2М (Беларусь), сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA II SBH (Чехия). Исследование элементного состава проводилось на сканирующих электронных микроско-

пах Tescan VEGA II SBH (Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 350/XT с безазотным детектором X-Act ADD (OXFORD Instruments NanoAnalysis, Великобритания) при линейном непрерывном и шаговом сканировании, а также сканировании по площади.

Рентгеноструктурный анализ осуществлялся на дифрактометре ДРОН-3М в $\text{CoK}\alpha$ -излучении в режиме сканирования (по точкам) с шагом $0,1^\circ$.

Результаты исследования

Морфология, структура и фазовый состав механически легированных порошков. В соответствии с классификацией, представленной в [1], керамические композиции относятся к третьей категории материалов, в которых в процессе механосинтеза на всем интервале обработки превалирует измельчение компонентов, сопровождающееся гомогенизацией по составу.

Результатом обработки металло-керамической шихты в механореакторе является композиционный порошок (рис. 1), состоящий из частиц, размер и форму которых можно оценить по изображениям, полученным с помощью сканирующей электронной микроскопии.

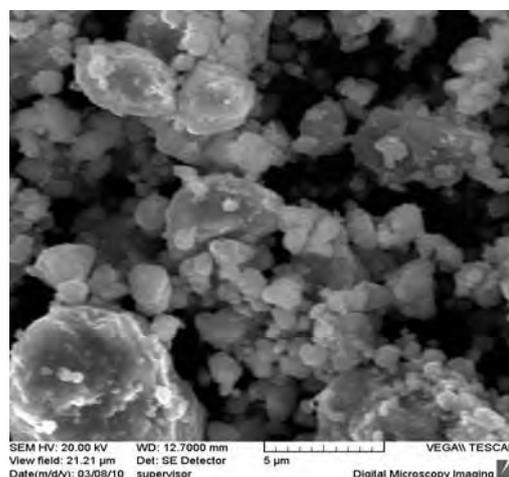
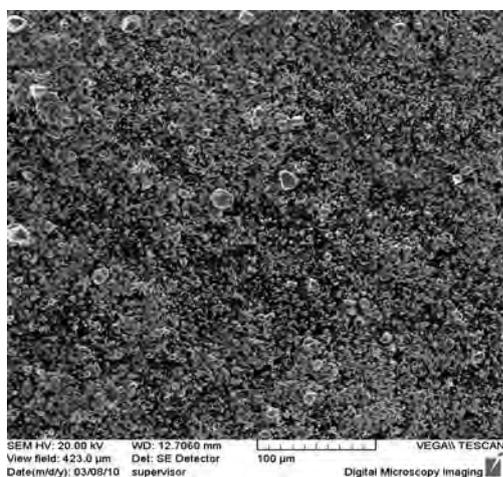


Рис. 1. Форма, размер и морфология частиц механически легированного порошка состава $78\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 13\% \text{TiO}_2 - 10\% \text{Ni}$

Как видно, частицы синтезированных материалов имеют угловатую форму с размерами, близкими во всех пространственных направлениях. Основная масса частиц в поперечном сечении не превышает 5 мкм, однако наблюдается присутствие отдельных конгломерированных частиц с размером до 20 мкм.

Применение разработанных механически легированных мелкодисперсных порошков позволит снизить минимально возможную толщину формируемых покрытий. Помимо этого, они будут отличаться меньшей пористостью, что позволит увеличить их механические и эксплуатационные характеристики.

Согласно рентгеноструктурным исследованиям, обработка керамической композиции в механореакторе сопровождается уменьшением пиков, относящихся к оксиду титана (TiO_2 , рутил), что обусловлено образованием сложного оксида Al_2TiO_5 , а также переходом его в аморфное состояние. Также наблюдается уменьшение пиков, принадлежащих никелю и корунду, что свидетельствует об уменьшении размера зерен и субзерен. В результате механосинтеза область когерентного рассеивания $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ уменьшается в 2,5 раза, а плотность дислокаций возрастает с $2,7 \cdot 10^8$ до $1,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Параметры решетки низкотемпературной фазы оксида алюминия составляют: $a = 4,761991 \text{ \AA}$; $b = 13,01613 \text{ \AA}$.

Покрyтия из разработанных металлокерамических порошков

В качестве эталона для оценки результатов, полученных при исследовании покрытий из разработанных механически легированных порошков, использовали керамическую композицию $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13 \% \text{ TiO}_2$, представляющую собой механическую смесь компонентов, частицы которых объединены между собой в конгломераты небольшим количеством связующего. Были изучены микроструктура получаемого покрытия

и его склонность к растрескиванию и отслоению от подложки в процессе изгиба.

В процессе экспериментов было установлено, что покрытия из композиционного порошка состава $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13 \% \text{ TiO}_2$, выбранного в качестве базового и прошедшего операцию механического легирования, отличаются меньшей склонностью к растрескиванию. Данная закономерность характерна как для случаев перегрева напыленного слоя, так и для случаев формирования слоев большой толщины. Последнее наиболее часто способствует образованию трещин в керамических материалах.

Зачастую покрытия, получаемые напылением глинозема или механической смеси глинозема и рутила, пронизаны сплошной сеткой микро- и макротрещин, что наблюдается даже при незначительном отклонении от оптимальных режимов нанесения слоя (рис. 2, а). При этом стоит добавить, что микротрещины присутствуют и при оптимальных условиях напыления (рис. 2, б). Гомогенизация и выравнивание частиц по размеру, сопровождающие процесс обработки в механореакторе, не позволяют получать покрытия без трещин, однако наблюдается существенное снижение их количества на макроуровне (рис. 3).

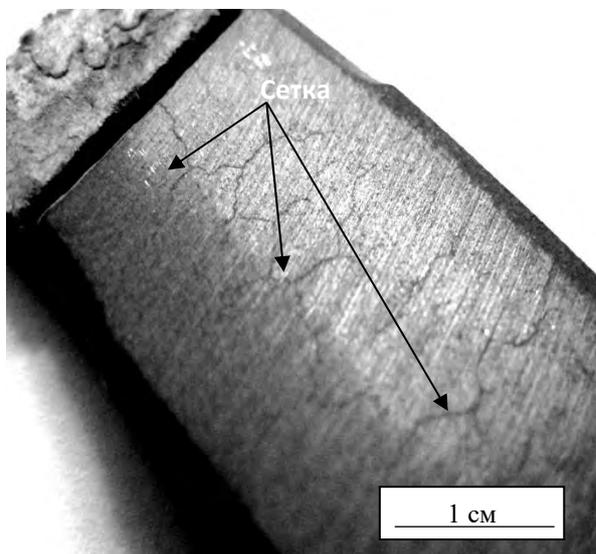
Для получения покрытий с минимальным количеством трещин на микроуровне и полностью лишенных макротрещин наиболее перспективно использование композиционных порошков, содержащих небольшое количество пластичных компонентов. С этой целью в состав керамической основы вводили алюминий и/или никель. Их присутствие в порошке обеспечивает армирующий эффект и способствует снижению внутренних напряжений за счет равномерного распределения по границам зерен хрупкой матрицы, что позволит увеличить стойкость к тепловым ударам и вязкость, а также снизить склонность к отслоению.

Исследования микроструктуры

показали, что присутствие металлической добавки полностью избавляет покрытие от трещин на макроуровне в

случае напыления при оптимальных условиях (рис. 4).

а)



б)

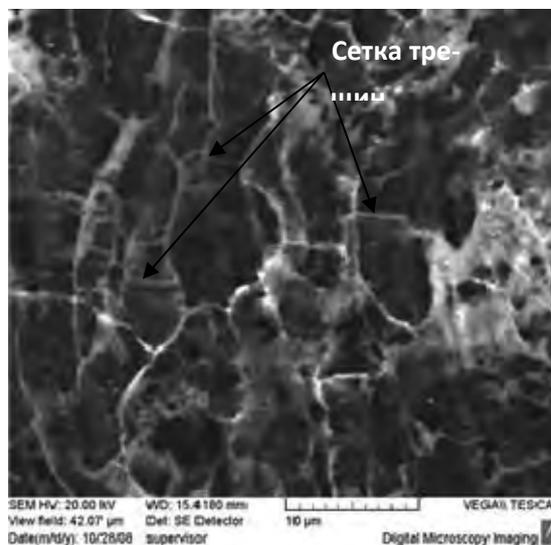


Рис. 2. Структура керамического покрытия, полученного плазменным напылением механической смеси порошков $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$

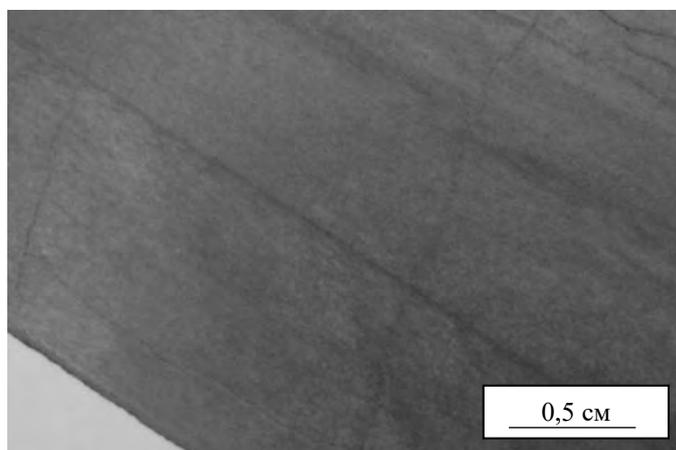


Рис. 3. Плазменное покрытие из механически легированного порошка состава $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$

Полученный результат объясняется тем, что вводимый в исходную композицию металл в ходе обработки в механореакторе равномерно распределяется в керамической основе, создавая плакирующий слой на поверхности частиц, зерен и субзерен. В процессе

напыления механически легированного металллокерамического порошка в объеме покрытия формируются тончайшие прослойки, обогащенные металлом, толщиной менее 1 мкм (рис. 5), которые обеспечивают релаксацию внутренних напряжений.

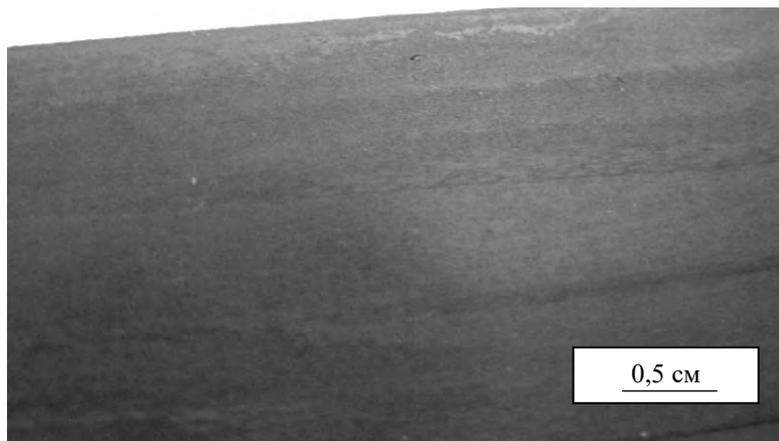


Рис. 4. Плазменное покрытие из механически легированного порошка состава $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2 - 10\% \text{Ni}$

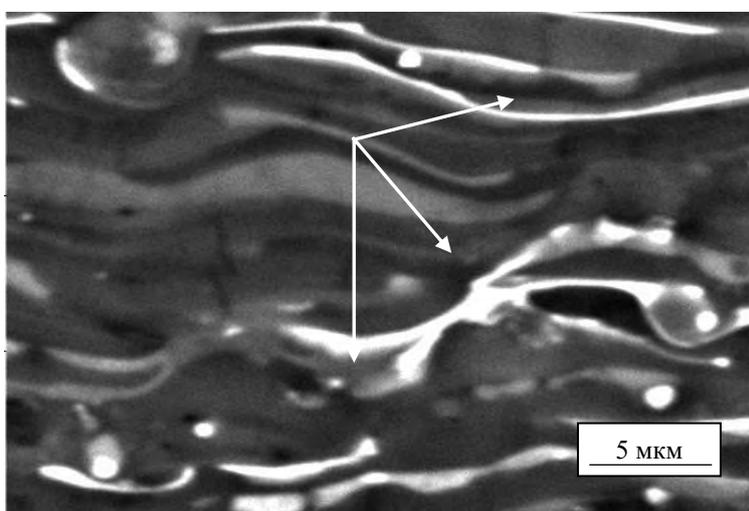


Рис. 5. Микроструктура плазменного покрытия состава $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2 + 10\% \text{Ni}$

Плазменное напыление разработанного металлокерамического порошка композиции $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13\% \text{TiO}_2 - 10\% \text{Ni}$ сопровождается рядом превращений, основными из которых являются образование сложного соединения $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, а также полиморфное превращение низкотемпературной модификации $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в высокотемпературную модификацию $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, количество которой в слое достигает 70 %. Содержание $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ – около 15 %, $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ – 10 %. Также присутствует никель в количестве около 5 %. Наличие диоксида титана рентгеноструктурный анализ не выявил (рис. 6).

Машиностроение

Плазменное напыление приводит к увеличению плотности дислокаций в формируемых покрытиях до $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ по сравнению с синтезированным порошком, в котором значение данного параметра составляет $1,1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ (для $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Степенное распределение деформаций по объему зерна свидетельствует об упорядоченном расположении дислокаций. Область когерентного рассеивания в плазменном покрытии уменьшается, по сравнению с исходным порошком, с 24 до 14 нм.

Полученные слои подвергали испытанию на изгиб. Результаты показав-

ли, что газотермические покрытия из металлокерамических порошков имеют более высокую прочность сцепления с подложкой и вязкость. Так, покрытия из неметаллизированного порошка, нане-

сенные на образец с толщиной стенки менее 0,25 мм, при деформации хрупко разрушаются с отделением покрытия от подложки.

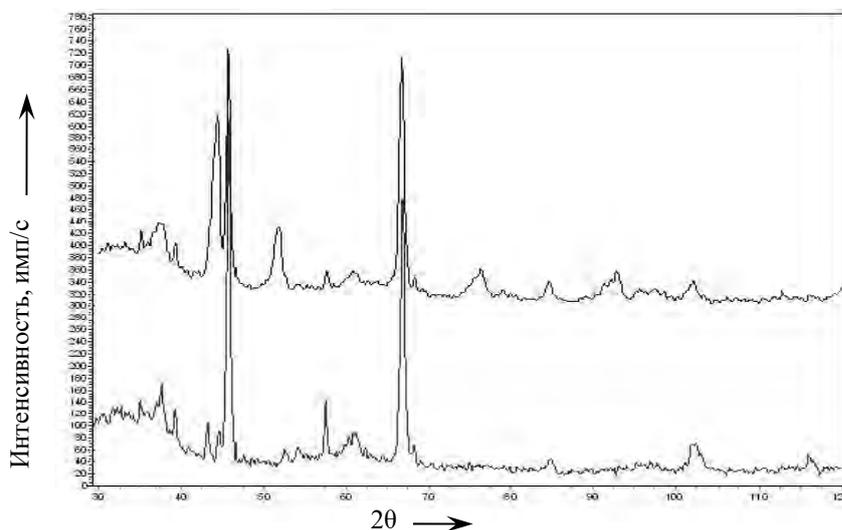


Рис. 6. Рентгенограммы плазменных покрытий, сформированных из порошков составов $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13\% \text{TiO}_2 - 10\% \text{Ni}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13\% \text{TiO}_2$, изготовленных способом механического легирования

Деформация покрытия, имеющего аналогичные геометрические параметры и полученного из механически легированного металлокерамического порошка, также сопровождается разрушением. При этом полного отслоения от основы не происходит, а образуется ряд трещин в области деформации. Начало растрескивания начинается при большем значении угла деформации. К примеру, плазменное покрытие, полученное напылением керамического порошка состава $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$, сохраняет целостность при изгибе на угол $(4 \pm 0,5)^\circ$. В то же время в покрытии, в состав которого дополнительно ввели 10 % Ni, первые признаки разрушения проявляются при деформации на угол $(9 \pm 1)^\circ$. При этом стоит отметить, что с увеличением содержания металла в композиции наименьшее значение угла изгиба, при котором фиксируется начало разрушения слоя, увеличивается.

Для установления зависимости

влияния Ni и Al на свойства плазменных покрытий из металлокерамических порошков был реализован полнофакторный эксперимент. Переменным фактором являлось содержание в композиции никеля и алюминия, количество которых в шихте варьировалось в интервалах 7,5 %...12,5 % и 3,75 %...6,25 % соответственно. Время обработки в механореакторе – 8 ч. Нанесение покрытия осуществлялось на режимах работы плазмотрона, указанных ранее.

Относительная вязкость металлокерамических слоев оценивалась по углу деформации покрытия с подложкой. В качестве эталона был выбран образец с покрытием из порошка состава $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13\% \text{TiO}_2$, полученного конгломерированием.

В результате проведения экспериментов и обработки полученных данных была установлена следующая зависимость относительной вязкости плазменных металлокерамических покрытий от

содержания металлических компонентов: $\mu_{\text{отн}} = 1,52 - 0,118x_{12} - 0,117x_{11}^2$.

Графическая интерпретация модели представлена на рис. 7.

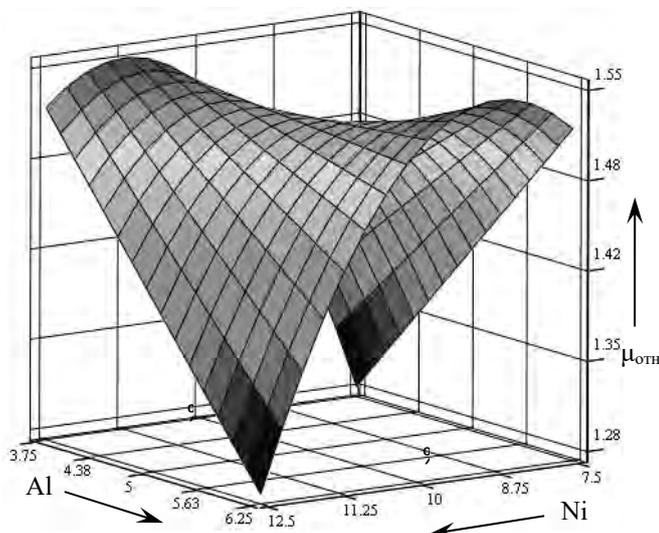


Рис. 7. Изменение вязкости покрытий из порошков на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13\% \text{TiO}_2 - \text{Ni} - \text{Al}$ в зависимости от количества алюминия и никеля в исходной шихте

Согласно полученной графической модели, наибольшей вязкостью обладают покрытия с максимальным содержанием одного из вводимых металлов при минимальном содержании второго. Подобное поведение можно объяснить тем, что при наибольшей разнице в содержании двух металлов образуется минимальное количество хрупких интерметаллидов, способных увеличить износостойкость, но снижающих вязкость слоя.

Таким образом, механосинтез керамических порошков на основе оксидной керамики позволяет получить покрытия, отличающиеся повышенной вязкостью и меньшей склонностью к образованию трещин. Введение в состав исходной композиции порошков никеля и/или алюминия способствует росту вязкости до 2 раз. Это позволяет значительно повысить стойкость покрытий к трещинообразованию, включая случаи отклонения режимов напыления от оптимальных значений. Полученные покрытия отличаются сложным неравно-

весным фазовым составом, основу которого составляет высокотемпературная фаза $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Дополнительная подготовка порошка перед напылением

Применение мелкодисперсных керамических порошков связано с рядом технологических трудностей. Основными из них являются низкая сыпучесть и склонность к комкованию, что способствует зависанию их в бункере питателя, налипанию на стенки воздушно-порошкового тракта, неравномерной подаче в плазменную струю. В связи с этим есть потребность в совершенствовании технологического процесса напыления.

Использование синтезированных порошков на основе оксидной керамики, в сочетании с усовершенствованием технологии их напыления, не только обеспечит возможность формирования покрытий с высокой стойкостью против тепловых и механических ударов, но

также позволит существенно увеличить эффективность процесса напыления и снизить потребление электроэнергии.

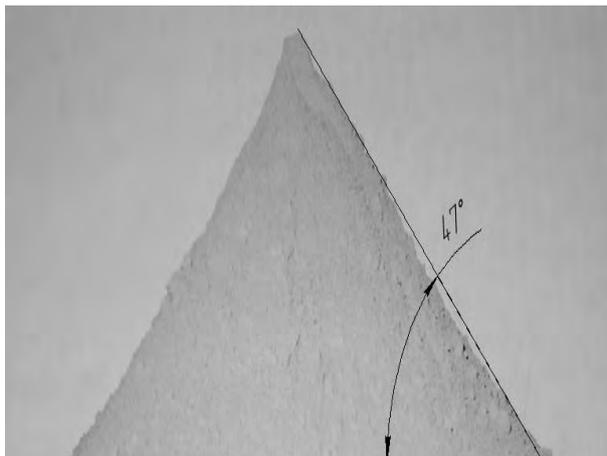
Для порошков с низкой сыпучестью, к которым относится большинство керамических материалов для газотермических способов напыления, текучесть можно определить по углу естественного откоса, образуемому между горизонтальной плоскостью и касательной к профилю конуса свободно насыпанного порошка. Увеличение угла естественного откоса соответствует снижению сыпучести материала [4, 5].

В процессе исследований было установлено, что керамические материалы с размером частиц до 63 мкм в исходном состоянии при температуре 20 °С

и нормальной влажности образуют угол естественного откоса более 45° (рис. 8, а), что однозначно свидетельствует об их низкой сыпучести.

С целью усовершенствования технологии напыления был разработан специальный способ подготовки порошков, позволивший существенно повысить их текучесть. Он включает этапы смешивания порошка со связующим, сушку полученной массы, измельчение высушенного брикета и отсев требуемой фракции. Перед использованием полученный порошок просушивается в печи и загружается в бункер питателя в нагретом состоянии. В процессе напыления температура порошка поддерживается на постоянном уровне.

а)



б)

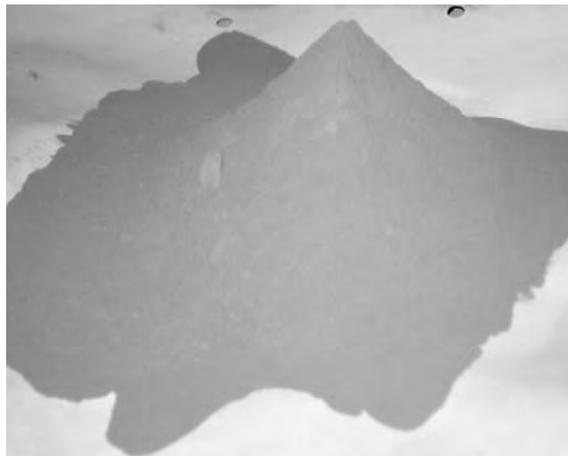


Рис. 8. Предварительно подогретый до 20 °С (а) и 160 °С (б) механически легированный металлокерамический свободно насыпанный порошок

Порошок, подготовленный по разработанной технологии и подогретый до температуры выше 150 °С, приобретает свойства свободно текучего материала (рис. 8, б). Это позволяет увеличить стабильность процесса напыления и его производительность, а также снизить пористость формируемых покрытий.

Выводы

1. Процесс обработки в механоректоре исходной шихты состава

$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2 - \text{Ni}$ сопровождается формированием гомогенного порошкового материала, а также фазовыми и структурными превращениями, результатом которых является образование новых фаз, значительное увеличение плотности дислокаций, а также их упорядочение, что подтверждается уменьшением области когерентного рассеивания и увеличением параметров кристаллической решетки основы.

2. Плазменное напыление синтезированных металлокерамических порош-

ков на основе композиции 78 % Al_2O_3 – 13 % TiO_2 – 10 % Ni сопровождается превращениями, активирующимися в процессе нанесения покрытия и заключающимися в переходе низкотемпературной фазы ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) в высокотемпературную ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), а также ее стабилизацией благодаря быстрому охлаждению на подложке; появлением сложного химического соединения $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$.

3. В результате плазменного напыления плотность дислокаций в основной фазе (Al_2O_3) увеличивается в формируемых покрытиях до величины $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ по сравнению с синтезированным порошком, в котором значение данного параметра составляет $1,1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Область когерентного рассеивания в плазменном покрытии уменьшается с 24 до 14 нм.

4. Структура плазменных покрытий, полученных из разработанных металлокерамических порошков, характеризуется присутствием в слое тончайших

включений никеля, упрочненных ультрадисперсными частицами $\text{Ni}_3(\text{Al, Ti})$, оксидов титана и алюминия. Никелевые включения располагаются по границам зерен оксидов, при этом их толщина менее $1 \cdot 10^{-3}$ мм. Наличие включений никеля способствует эффективной релаксации внутренних напряжений, что значительно снижает вероятность образования трещин в покрытии и их отслоение от подложки.

5. Для разработанных механически легированных металлокерамических порошков, состоящих из частиц осколочной формы с величиной основной фракции не более 5 мкм, разработана специальная технология подготовки порошка перед напылением, которая позволяет улучшить сыпучесть материала, а также увеличить производительность процесса, снизить расход электроэнергии, уменьшить пористость покрытий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов: монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина; под ред. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с.: ил.
2. **Эсибян, Э. М.** Энергетические и технологические особенности воздушно-газового плазменного напыления / Э. М. Эсибян, А. Г. Саков // Автоматическая сварка. – 1989. – № 10. – С. 28–32.
3. **Кудинов, В. В.** Плазменные покрытия / В. В. Кудинов. – Москва: Наука, 1977. – 184 с.
4. **Кудинов, В. В.** Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / В. В. Кудинов, В. М. Иванов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 192 с.

Статья сдана в редакцию 13 июня 2024 года

Контакты:

5trannik@tut.by (Федосенко Алексей Сергеевич);
lovshenko2014@yandex.ru (Ловшенко Федор Григорьевич);
belyakovich.2012@mail.ru (Беякович Виктор Александрович);
Paal10319@gmail.com (Андреев Илья Константинович);
capsloock3333@mail.ru (Оленцевич Алексей Сергеевич).

**A. S. FEDOSENKO, F. G. LOVSHENKO, V. A. BELYAKOVICH, I. K. ANDREYEV,
A. S. OLIENTSEVICH**

**METAL-CERAMIC POWDERS PRODUCED BY MECHANICAL ALLOYING
AND PLASMA COATINGS MADE OF THEM**

Abstract

The article presents the results of research aimed at developing composite ceramic-based powders manufactured using the method of mechanical alloying, and the technology of their preparation for high-performance spraying of plasma coatings. The results of studies of powders' characteristics, as well as their phase composition and morphology, are given. The article also considers the results of studying the structure and properties of the coatings.

Keywords:

reactive mechanical alloying, plasma spraying, composite powder, wear resistance, ceramic coatings, metal ceramics.

For citation:

Metal-ceramic powders produced by mechanical alloying and plasma coatings made of them / A. S. Fedosenko, F. G. Lovshenko, V. A. Belyakovich, I. K. Andreyev, A. S. Olientsevich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 61–71.