

УДК 669.017

А. С. Федосенко, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

UDC 669.017

A. S. Fedosenko, F.G. Lovshenko, G.F. Lovshenko

OPTIMIZATION OF PRODUCING MECHANICAL ALLOYED COMPOSITE POWDER MATERIALS FOR WEAR-RESISTANT SPRAYED PLASMA COATINGS

Аннотация

Приведены результаты исследований, направленных на установление оптимального химического состава исходной шихты и времени ее обработки в механореакторе с целью получения композиционных порошков для плазменного напыления покрытий, отличающихся высокой твердостью и износостойкостью, а также изучено влияние условий напыления разработанных порошков на плотность покрытий и определено их оптимальное значение.

Ключевые слова:

механическое легирование, порошки, газотермическое напыление, плазменные покрытия, твердость, плотность, износостойкость, пористость.

Abstract

The paper presents the results of the research aimed at establishing the optimal chemical composition of the initial charge and time of its processing in the mechanoreactor in order to produce composite powders for plasma spraying of coatings, characterized by high hardness and wear resistance; the influence of spray conditions of developed powders upon coatings density has been studied and their optimal value has been determined.

Key words:

mechanical alloying, powders, gas-thermal spraying, plasma coatings, hardness, density, wear resistance, porosity.

Введение

Одними из важнейших факторов, определяющих возможность получения газотермических покрытий высокой твердости и износостойкости, являются свойства наносимого материала. Во многом они определяются его химическим составом и в значительной степени наследуются формируемым покрытием. В случае получения порошковых материалов по технологии реакционного механического легирования на их свойства оказывает влияние не только химиче-

ский состав синтезируемого материала, но и технологические параметры обработки исходной композиции в механореакторе [1, 2].

Одним из важных параметров сформированного покрытия, обеспечивающим заданный комплекс физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик, является его плотность [3], которая зависит от большого количества факторов, включающих как характеристики применяемого материала, так и условия напыления.

Целью работы являлось установление оптимальных условий получения механически легированных порошковых материалов, а также плазменных покрытий из них, отличающихся высокой твердостью и износостойкостью.

Методика исследований

Исследования проводились на композициях следующих систем: Fe–Al–Fe₂O₃, Fe–Cr–C, Fe–Ni–Cr–C–(Fe₂O₃ + Al), Ni–Al, Al₂O₃–13 % TiO₂–Ni–Al.

Механическое легирование исследуемых порошковых композиций проводилось при следующих режимах работы механореактора: ускорение рабочих тел – $a_n = 135 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$; отношение объема рабочих тел к шихте – $k = 12$; заполнение помольной камеры рабочими телами – $\varepsilon = 75 \%$. Время обработки τ варьировалось в интервале 6...12 ч.

Напыление порошков проводилось

с использованием дугового плазмотрона оригинальной конструкции (аналог ПУН-1), работающего на воздушно-пропановой плазмообразующей смеси. Порошок подавался на срез сопла. При исследовании влияния параметров процесса напыления на плотность покрытий базовые режимы нанесения слоев из материалов на основе материалов составляли: сила тока – 220 А; напряжение – 200 В; дистанция напыления – 250 мм; диаметр отверстия подающей трубки – 2 мм; расстояние от среза сопла до выходного отверстия подающей трубки – 5 мм. Получение покрытий из композиционных материалов на основе системы Fe–Cr–C и Al₂O₃–TiO₂ проводилось со следующими корректировками: дистанция напыления – 150 мм; диаметр отверстия подающей трубки – 1,7 мм.

Оптимизация условий напыления проводилась на материалах, химический состав и условия синтеза которых представлены в табл. 1.

Табл. 1. Базовые композиции и условия их получения

Состав композиции	Режимы механосинтеза	Температура отжига, К
Fe–30 % Al	$a_n = 135 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$; $k = 12$; $\varepsilon = 75 \%$; $\tau = 8 \text{ ч}$	870
Fe–30 % Al–14,13 % Fe ₂ O ₃		870
Ni– 5 % Al		–
40X13		570
Al ₂ O ₃ –13 % TiO ₂		–

Основные результаты исследований

Оптимизация состава исходной шихты и продолжительности механосинтеза исследуемых композиций

Исследования проводились на материалах следующих систем: Fe–30 % Al–Fe₂O₃, Fe–Cr–C, Fe–Ni–Cr–C, Al₂O₃–13 % TiO₂–Ni–Al. Оптимизация химического состава и времени обработки материалов проводилась в два этапа.

На первом методом однофакторного эксперимента устанавливались граничные значения переменных факторов. На втором для определения совместного влияния параметров, обеспечивающих получение покрытий с максимально высокими свойствами, реализовывался полнофакторный эксперимент, результаты которого обрабатывались с применением метода центрального ортогонального планирования второго порядка.

Влияние состава исходной шихты и времени ее обработки в механореакторе на твердость и износостойкость покрытий из материалов системы Fe–Al.

При описании области оптимума параметрами оптимизации являлись твердость формируемого покрытия и его износостойкость, переменными факторами – время обработки шихты в механореакторе и содержание легирующей добавки. Средние значения параметров оптимизации получены по результатам двух параллельных опытов.

Базовым материалом системы является композиция Fe–30 % Al. В качестве легирующей добавки, предназначенной для синтеза упрочняющей фазы (Al₂O₃), в нее дополнительно вводился оксид железа Fe₂O₃. Количество вводимого оксида железа рассчитывалось из условия образования от 1 до 10 % оксида алюминия и составляло 1,57...15,7 %. Время обработки варьировалось в диапазоне 6...12 ч.

На первом этапе исследований было установлено, что увеличение времени обработки шихты в механореакторе и количества вводимого в нее оксида железа приводят к росту твердости по-

крытий получаемых из синтезируемых порошков. Изменение износостойкости носит аналогичный характер.

Для установления совместного влияния состава шихты и времени обработки на свойства формируемых покрытий был реализован центральный композиционный ортогональный план второго порядка. При этом исследования проводились на материалах с содержанием оксида железа, равным 9,42...15,7 %, и временем обработки шихты 8...12 ч.

По результатам статистической обработки экспериментальных данных получены математические модели, адекватно представляющие результаты экспериментов:

1) твердость газотермических покрытий

$$HV = 602 + 21x_1 + 22x_2 - 10x_2^2; \quad (1)$$

2) относительная износостойкость

$$I_{\text{отн}} = 1,41 + 0,19x_1 + 0,07x_2 - 0,11x_1^2. \quad (2)$$

Графическая интерпретация моделей, показывающая зависимость исследуемых параметров от переменных факторов, представлена на рис. 1.

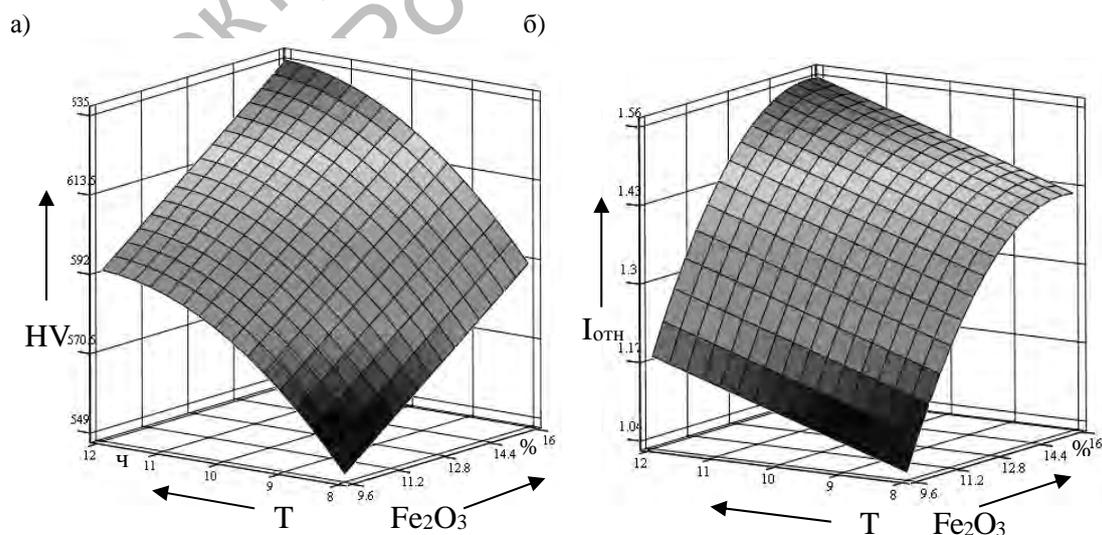


Рис. 1. Влияние содержания легирующей добавки и времени обработки композиций системы Fe–30 % Al–Fe₂O₃ на твердость (а) и износостойкость (б) плазменных покрытий

Таким образом, оптимальными условиями получения материалов системы Fe–30 % Al–Fe₂O₃, обеспечивающими формирование покрытия максимальной твердости и износостойкости в исследуемом интервале, являются время обработки 12 ч и количество легирующего соединения 15,7 %.

Влияние состава исходной шихты и времени ее обработки в механореакторе на твердость и износостойкость покрытий из материалов системы Fe–Cr–C.

Для материалов данной группы был реализован однофакторный эксперимент, описывающий влияние времени обработки композиций на твердость и

относительную износостойкость получаемых покрытий.

Исследования проводились на трех композициях, химический состав которых соответствует сталям 40X13, X13, 95X18. Композиции содержали 13 и 18 % хрома и 0,4, 1, 0,95 % углерода соответственно. Время обработки варьировалось в диапазоне 4...12 ч.

Для материалов данной группы наблюдается одинаковая зависимость изменения твердости покрытий, получаемых из синтезируемых материалов, от времени обработки шихты в механореакторе – увеличение времени механосинтеза ведет к росту твердости формируемого слоя (рис. 2, а).

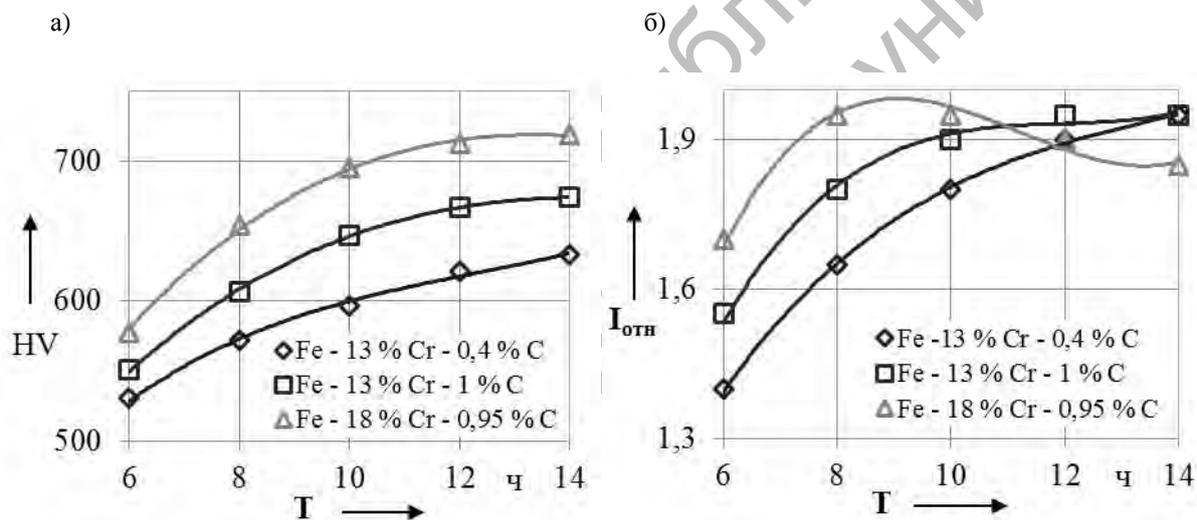


Рис. 2. Влияние времени обработки в механореакторе композиций системы Fe–Cr–C на твердость (а) и относительную износостойкость (б) плазменных покрытий

Снижение износостойкости покрытий состава Fe–18 % Cr–0,95 % C при увеличении времени обработки исходной композиции свыше 10 ч, вероятно, связано с ростом его хрупкости, обусловленным увеличением количества в его составе карбидов и оксидов.

Оптимизация состава исходной шихты и времени обработки в механореакторе композиций системы Fe–Ni–Cr–C–(Fe₂O₃ + Al) типа (12X18H10–Al₂O₃).

Базовым составом материалом дан-

ной системы является композиция состава Fe–18 % Cr–10 % Ni–0,12 % C. В качестве легирующей добавки дополнительно вводился оксид железа Fe₂O₃. Восстановителем служил алюминий, введенный в количестве 0,6...3,2 %. Соотношение между количеством вводимого оксида железа и алюминием стехиометрическое. Как и в случае с системой Fe–Al, введение оксида железа должно обеспечить дополнительное упрочнение, инициируемое образованием оксида алюминия Al₂O₃ в результате окисли-

тельно-восстановительной реакции.

Параметрами оптимизации являлись твердость покрытий и их износостойкость; переменными факторами – время обработки и содержание легирующей добавки Fe_2O_3 .

По результатам статистической обработки экспериментальных данных получены математические модели, адекватно представляющие результаты экспериментов:

1) твердость газотермических по-

крытий

$$\text{HV} = 378 + 11x_1 + 19x_2 - 9x_1^2 - 10x_2^2; \quad (3)$$

2) относительная износостойкость

$$\begin{aligned} I_{\text{отн}} = & 1,2531 + 0,1267x_1 + \\ & + 0,1067x_2 - 0,094x_1^2. \quad (4) \end{aligned}$$

Графическая интерпретация моделей, показывающая зависимость исследуемых параметров от переменных факторов, представлена на рис. 3.

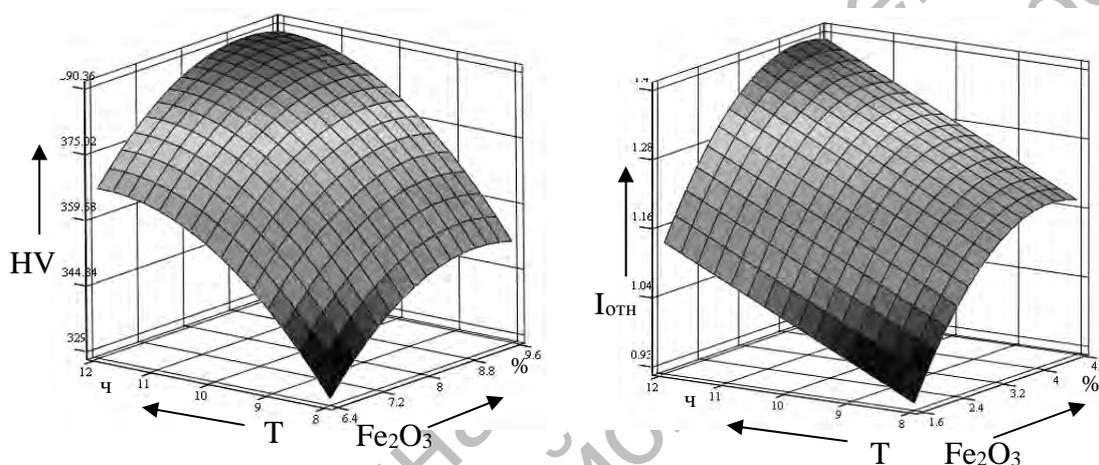


Рис. 3. Влияние содержания легирующей добавки и времени обработки композиций системы $\text{Fe-Ni-Cr-C-(Al-Fe}_2\text{O}_3)$ на твердость (а) и относительную износостойкость (б) плазменных покрытий

Таким образом, исходя из полученных данных (рис. 3), можно заключить, что максимальная твердость покрытий достигается при обработке шихты в течение 12 ч, и содержании легирующего компонента 9,42 %. Максимальным значением относительной износостойкости покрытия обладают при аналогичном времени обработки и количестве легирующей добавки равном $\approx 4,4$ %.

Оптимизация химического состава исходной шихты механически легированных композиций металлизированной керамики на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Al}$.

Для данной системы параметрами оптимизации являлись вязкость покрытий и их износостойкость, переменными

факторами – содержание легирующих добавок никеля и алюминия, количество которых варьировалось от 2,5 до 12,5 % и от 1,25 до 6,25 % соответственно. Время механосинтеза составляло 8 ч.

Установлено, что зависимости вязкости и износостойкости исследуемых покрытий от количества легирующих добавок в напыляемом материале описываются кривыми с максимумом. Это, вероятно, обусловлено изменением фазового состава металлической составляющей – максимальная износостойкость покрытий совпадает с соотношением металлических компонентов в шихте, соответствующем образованию интерметаллида NiAl .

По результатам статистической обработки экспериментальных данных получены математические модели, адекватно представляющие результаты экспериментов:

1) относительная вязкость газотермических покрытий

$$\mu_{\text{отн}} = 1,52 - 0,118x_{12} - 0,117x_1^2; \quad (5)$$

2) относительная износостойкость

$$I_{\text{отн}} = 1,750 + 0,108x_1 + 0,057x_2 - 0,065x_{12} - 0,139x_1^2 - 0,124x_2^2. \quad (6)$$

Графические интерпретации моделей, показывающих зависимость изменения исследуемых параметров от переменных факторов, представлена на рис. 4.

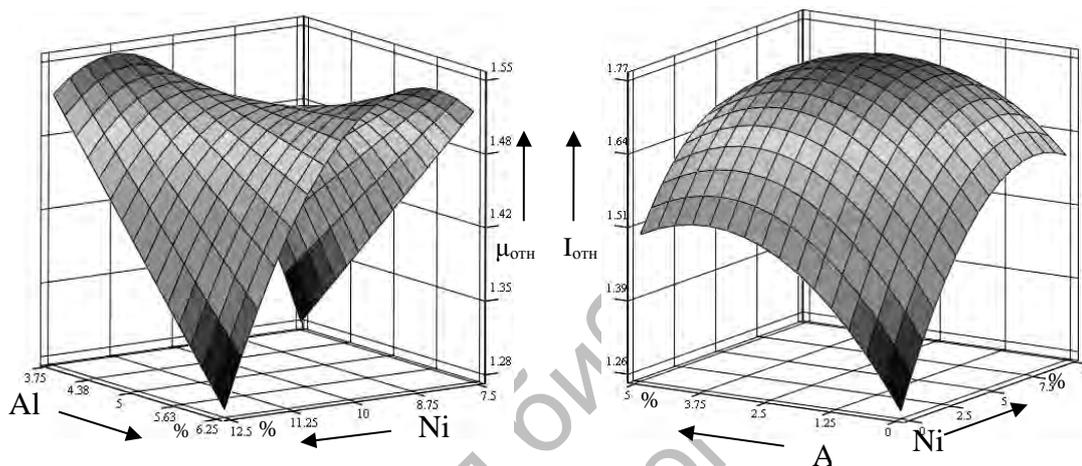


Рис. 4. Зависимость вязкости (а) и относительной износостойкости (б) покрытий из композиций системы Al_2O_3 -13 % TiO_2 -Ni-Al от количества никеля и алюминия в исходной шихте

Как видно из графика (рис. 4, а), наибольшей вязкостью покрытия обладают в случае максимального количества одного из легирующих компонентов при одновременном наименьшем количестве второго. Вероятно, это связано с тем, что такое соотношение обеспечивает присутствие в покрытии повышенного количества одного из легирующих металлов в исходном виде и минимальное количество интерметаллидов, обладающих высокой твердостью и повышенной хрупкостью. Напротив, максимальную износостойкость имеют покрытия, количество легирующих компонентов в которых приближено к стехиометрическому соотношению, необходимому для синтеза интерметаллида NiAl, отличающегося высокой твердостью (рис. 4, б).

Влияние параметров процесса плазменного напыления на плотность формируемых покрытий

В качестве технологических параметров процесса напыления, оказывающих наибольшее влияние на плотность формируемого слоя, были выбраны размер частиц порошка, диаметр отверстия подающей трубки, рабочая мощность плазмотрона, дистанция напыления.

Оптимизация осуществлялась методом однофакторного эксперимента.

Как показали предварительные исследования [3], допустимая пористость покрытий, по возможности, не должна превышать 5 %. В этом случае наличие пор не оказывает значительного влияния на изменение износо-

стойкости покрытий. Исходя из этого, при проведении оптимизации процесса напыления было принято, что условия формирования слоя должны обеспечивать плотность не ниже 95 %.

Влияние размера частиц на плотность покрытий.

Диаметр частиц является важной характеристикой напыляемого материала, оказывающей влияние на степень его расплавления в высокотемпературной струе, а следовательно, и на плотность формируемого слоя.

Для определения оптимального

размера частиц, обеспечивающего формирование покрытия наибольшей плотности, исследуемые материалы условно классифицировались на три фракции (табл. 2). Из исследуемых композиций разделению не подвергались лишь композиции 4 и 5, 96 % частиц которых имеют размер, не превышающий 63 мкм.

В результате проведенных исследований были получены зависимости, позволившие определить предпочтительный размер частиц каждой из исследуемых композиций (рис. 5).

Табл. 2. Фракции порошковых материалов и средний размер частиц в них

Основная фракция порошкового материала, мкм	25...45	45...125	100...170
Средний размер частиц во фракции, мкм	35	85	135

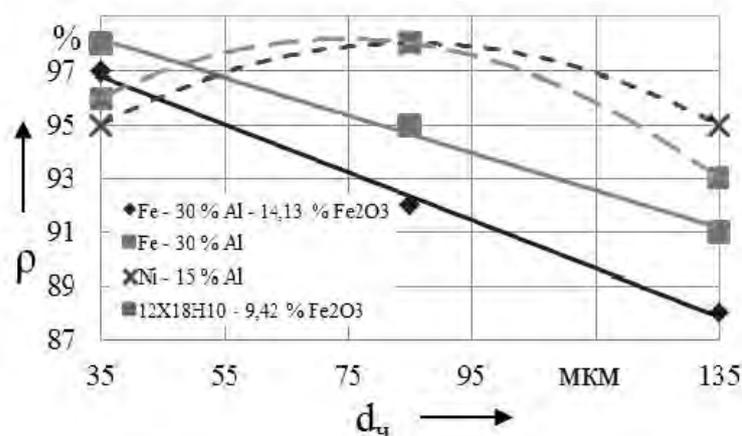


Рис. 5. Влияние размера частиц напыляемого порошкового материала на плотность плазменных покрытий

Согласно полученным данным, для большинства исследуемых композиций оптимальный размер частиц наносимого материала составляет 45...125 мкм. Исключением являются материалы на основе системы Fe–Al, для которых средний размер частиц не должен превышать 55 мкм.

Влияние диаметра отверстия подающей трубки на плотность покрытий.

Диаметр выходного отверстия подающей трубки варьировался в интервале 1,5...2,3 мм. В ходе исследований были получены следующие зависимости (рис. 6).

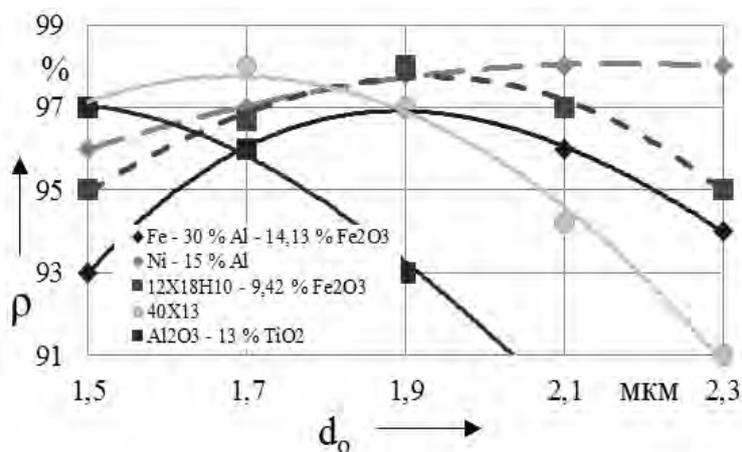


Рис. 6. Изменение плотности формируемого покрытия в зависимости от диаметра отверстия подающей трубки

Наиболее существенное влияние на плотность формируемых покрытий на основе металлов диаметр отверстия подающей трубки оказывает при напылении материала 40X13. Для него превышение данного размера более 1,8 мм приводит к росту пористости формируемого слоя.

При напылении прочих композиций диаметр не оказывает столь существенного влияния на плотность. Его увеличение свыше 2 мм вызывает некоторое снижение плотности, что объясняется процессом захлаживания высокотемпературной струи, связанным с повышением расхода материала и транспортирующего газа.

Поскольку с уменьшением диаметра отверстия производительность процесса напыления и его КПД снижаются, а увеличение его значения более 2 мм приводит к росту пористости, для подачи большинства материалов оптимальным размером отверстия подающей трубки следует считать 2 мм. Для напыления порошковых композиций на основе системы Fe–Cr–C, следует принять размер 1,8 мм, а для материалов на основе оксидной керамики – 1,7 мм.

Влияние мощности плазменного потока на плотность формируемых покрытий.

Известно [4], что повышение температуры плазменного потока позволяет сократить время, необходимое для полного расплавления напыляемой частицы, или при условии сохранения дистанции напыления увеличить степень ее расплавления или пластификации. При этом увеличение температуры струи обеспечивается в большинстве случаев повышением мощности, потребляемой плазмотроном.

При проведении эксперимента рабочая мощность плазмотрона изменялась в интервале 30...50 кВт.

Из полученных зависимостей видно (рис. 7), что увеличение мощности, потребляемой плазмотроном, приводит к повышению плотности формируемых покрытий. В то же время при выборе ее оптимального значения необходимо принимать во внимание тот факт, что с увеличением тепловложения в частицу происходит ее перегрев и более интенсивное окисление. Увеличивается интенсивность нагрева подложки.

Исходя из вышеизложенного, рабочую мощность следует выбирать из условия минимально достаточного

значения, обеспечивающего получение покрытий с заданной плотностью (не ниже 95 %).

Влияние дистанции напыления на плотность формируемых покрытий.

При установлении оптимальной дистанции напыления руководствовались тем, что она должна обеспечивать

требуемую плотность покрытия и не вызывать чрезмерного перегрева напыляемой поверхности. В ходе исследований расстояние от среза сопла плазматрона до напыляемой поверхности изменялось в интервале 50...350 мм (рис. 8).

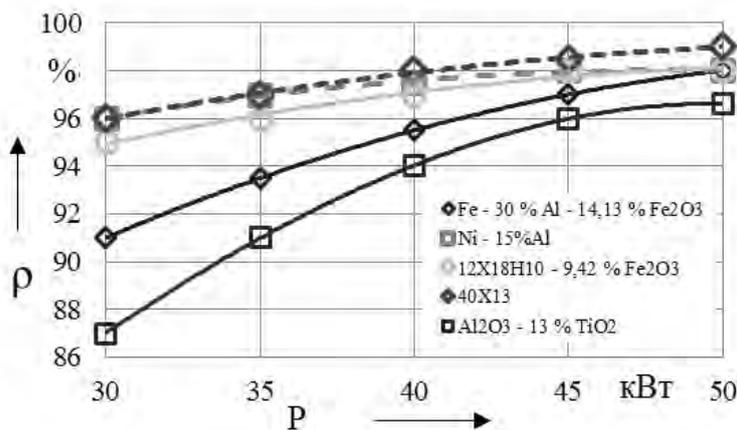


Рис. 7. Изменение плотности плазменных покрытий в зависимости от мощности потребляемой плазматроном

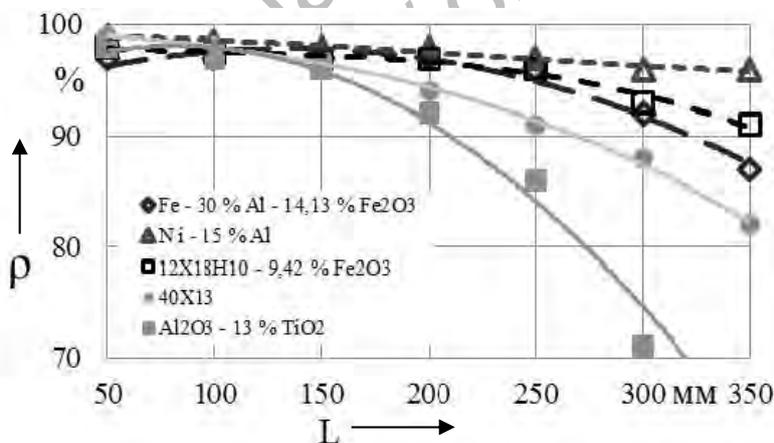


Рис. 8. Изменение плотности плазменных покрытий в зависимости от дистанции напыления

Как видно из рис. 8, для всех исследуемых композиций увеличение дистанции напыления в той или иной степени приводит к снижению плотности покрытий, формируемых из них. Наиболее заметное падение наблюдается при напылении композиционных материалов на основе систем Fe–Cr–C

(40X13) и Al₂O₃–TiO₂. Для композиций системы Fe–Cr–C расстояние от среза сопла до напыляемого изделия не должно превышать 180 мм. Для керамических композиций с учетом их физических свойств следует выбирать минимальную дистанцию напыления, значение которой не должно превышать

100...120 мм. Остальные материалы целесообразно напылять при дистанции 200...250 мм от среза сопла до изделия, что, с одной стороны, обеспечит высокую плотность покрытий, а с другой – минимизирует тепловложение в напыляемое изделие от высокотемпературной струи.

Согласно полученным результатам, наибольшее влияние на плотность покрытий из большинства композиций на основе металлов оказывают мощность плазменной струи и размер гранул напыляемого материала, для гранулированных композиций на основе системы Fe–Cr–C – мощность плазменной струи и дистанция напыления. Плотность покрытий на основе оксидной керамики наиболее значимо зависит от диаметра подающей трубки и мощности плазменного потока.

Для определения оптимальных режимов напыления разработанных порошковых материалов, обеспечивающих получение покрытий максимальной плотности, были проведены исследования по установлению совместного влияния выбранных факторов.

Оптимизация параметров процесса напыления покрытий

С целью определения оптимальных режимов напыления покрытий, обеспечивающих получение максимально плотного слоя, реализовывался полнофакторный эксперимент с применением центрального композиционного ортогонального плана второго порядка.

Оптимизация процесса напыления порошковых материалов на основе системы Fe–Cr–C.

Исследование проводили на материале состава Fe–13 % Cr–0,4 % C (40X13).

В качестве переменных факторов, оказывающих наиболее существенное и явное влияние на плотность формируе-

мого покрытий, была выбрана дистанция напыления и мощность плазменного потока. Средний размер гранул наносимого материала составлял 35 мкм. Рабочая мощность установки изменялась в пределах 30...40 кВт. Дистанция напыления варьировалась в интервале 100...180 мм.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена математическая модель, адекватно представляющая результаты исследований:

$$\rho = 97 - 4x_1 + 2,7x_2 - 4,6x_1^2. \quad (7)$$

Как видно из представленного графика (рис. 9), повышение мощности струи приводит к росту плотности формируемого слоя, а увеличение дистанции напыления к ее снижению. Таким образом, для материалов данной группы оптимальными условиями напыления является мощность высокотемпературного потока 40 кВт и дистанция напыления 115 мм.

Оптимизация процесса напыления порошковых материалов на основе системы Fe–Ni–Cr–C–(Al + Fe₂O₃).

Для оптимизации процесса был выбран материал состава Fe–18 % Cr–10 % Ni–0,12 % C + (6,28 % Fe₂O₃ + Al). В качестве переменных факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на плотность формируемого покрытия, были выбраны средний размер гранул наносимого материала и мощность плазменного потока. В эксперименте размер частиц составлял 35...135 мкм, рабочая мощность установки изменялась в интервале 30...50 кВт.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена математическая модель, адекватно представляющая результаты эксперимента:

$$y = 94 - 3,8x_1 + 3,8x_2 - 5,2x_1^2. \quad (8)$$

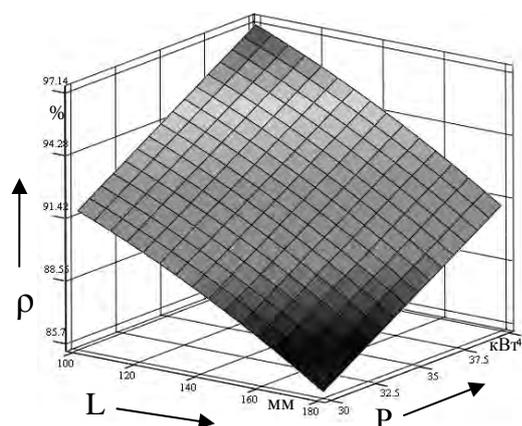


Рис. 9. Зависимость плотности формируемых покрытий из порошкового материала Fe–13 % Cr–0,4 % C от дистанции напыления и мощности плазменной струи

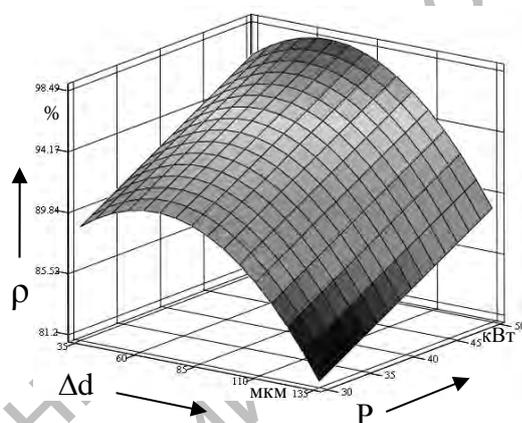


Рис. 10. Зависимость плотности формируемых покрытий из композиционного материала Fe–18 % Cr–10 % Ni–0,12 % C + (6,28 % Fe₂O₃ + Al) от среднего размера частиц и мощности плазменной струи

Наибольшей плотностью покрытия обладают в случае использования гранулированной композиции с размером частиц 75 мкм (рис. 10). Увеличение мощности плазменного потока ведет к повышению плотности покрытия. Таким образом, для данной группы материалов за оптимальные условия напыления можно принять мощность плазменной струи 45 кВт, средний размер гранул 85 мкм.

Оптимизация процесса напыления порошковой композиции Fe–30 % Al–Fe₂O₃.

Для оптимизации использовали порошок, полученный из шихты Fe–30 % Al–(7,85 % Fe₂O₃–Al). В каче-

стве переменных факторов, оказывающих наиболее существенное и явное влияние на плотность формируемого покрытия, были выбраны размер частиц наносимого материала и мощность плазменного потока. В эксперименте средний размер частиц составлял 35...135 мкм, потребляемая плазмотронном мощность изменялась в интервале 30...50 кВт.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена математическая модель, адекватно представляющая результаты эксперимента:

$$y = 87 - 9,3x_1 + 5,3x_2 - 4,7x_1^2 \quad (9)$$

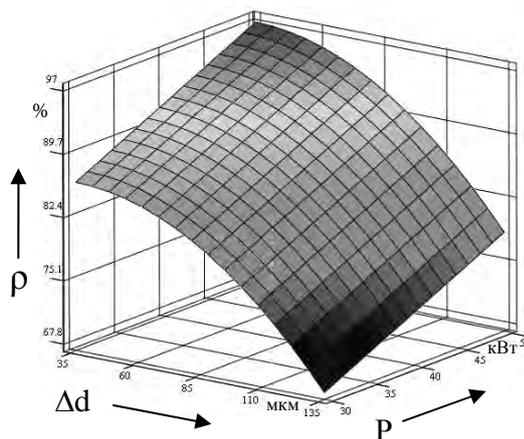


Рис. 11. Зависимость плотности формируемых покрытий из порошкового материала Fe–30 % Al–7,85 % Fe₂O₃ от среднего размера частиц и мощности потребляемой плазмотроном

Исходя из полученных данных (рис. 11), для рассматриваемой группы материалов оптимальными условиями напыления будут мощность плазменной струи ≈ 45 кВт, средний размер частиц 35 мкм.

Оптимизация процесса напыления композиционных материалов на основе системы Al₂O₃–TiO₂.

Для оптимизации использовали механически легированный материал состава Al₂O₃–13 % TiO₂. В качестве переменных факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на плотность формируемых покрытий, были выбраны диаметр отверстия подающей трубки и мощность потребляемая плазмотроном.

В эксперименте диаметр отверстия подающей трубки варьировался в интервале 1,4...2 мм, рабочая мощность установки изменялась от 35 до 45 кВт.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена математическая модель, адекватно представляющая результаты эксперимента:

$$y = 87 - 9,3x_1 + 5,3x_2 - 4,7x_1^2. \quad (10)$$

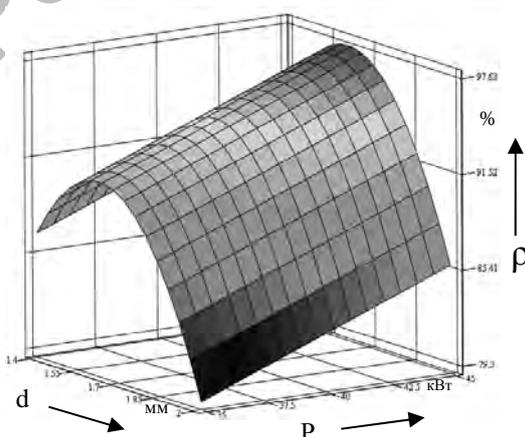


Рис. 12. Зависимость плотности формируемых покрытий из композиционного материала Al₂O₃–13 % TiO₂ от диаметра отверстия подающей трубки и мощности потребляемой плазмотроном

Исходя из полученных данных (рис. 12), для рассматриваемой группы материалов оптимальными условиями напыления будут мощность плазменной струи 40 кВт, диаметр подающей трубки 1,7 мм.

Таким образом, оптимальными условиями напыления разработанных порошковых материалов будут размер отверстия подающей трубки для большинства гранулированных композиций на основе металлов 2 мм, для композиций на основе систем Fe–Cr–C и Al₂O₃–TiO₂ – 1,8 и 1,7 мм соответственно. Дистанция напыления для материалов на основе металлов составляет 200...250 мм от среза сопла до изделия, для композиций Fe–Cr–C и Al₂O₃–TiO₂ – 100...120 мм. Мощность плазменной струи – не менее 40 кВт. Средний размер гранул напыляемого материала для большинства металлических композиций – 85 мкм, для материалов систем Fe–Cr–C, Fe–30 % Al и Al₂O₃–TiO₂ – 35 мкм.

Выводы

1. Установлено, что увеличение времени обработки шихты исследованных композиций в механореакторе при оптимальных технологических параметрах механического легирования в интервале 6...12 ч приводит к росту твердости и износостойкости покрытий, формируемых из полученных в результате механического легирования порошков, что обусловлено более полным завершением механохимических превращений в материале, образованием большего количества дисперсных

упрочняющих фаз, а также измельчением структуры материала.

2. Определены оптимальные составы исходных композиций, обеспечивающие получение плазменных покрытий с наибольшим значением износостойкости, которые составили:

– **материалы на основе железа:**

Fe–30 % Al–15,7 % Fe₂O₃;

Fe–18 % Cr–0,95 % C;

Fe–18 % Cr–10 % Ni – (9,42 % Fe₂O₃–Al);

– **материалы на основе металлизированной керамики:**

Al₂O₃–13% TiO₂–7,5 % Ni–3,75 % Al.

3. Исследовано влияние режимов напыления покрытий на их плотность и установлены оптимальные условия напыления разработанных композиционных порошковых материалов, которые имеют следующие параметры: размер отверстия подающей трубки для большинства синтезированных порошков на основе металлов 2 мм, для композиций на основе систем Fe–Cr–C и Al₂O₃–TiO₂ – 1,8 и 1,7 мм соответственно. Дистанция напыления для материалов на основе металлов составляет 200...250 мм от среза сопла до изделия, для композиций Fe–Cr–C и Al₂O₃–TiO₂ – 100...120 мм. Мощность плазменной струи – не менее 40 кВт. Средний размер гранул напыляемого материала для большинства металлических композиций – 85 мкм, для материалов систем Fe–Cr–C, Fe–30 % Al и Al₂O₃–TiO₂ – 35 мкм. Расстояние от среза сопла до выходного отверстия – 5 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ловшенко, Г. Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 276 с.
2. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко Б. Б. Хина ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.
3. **Ловшенко, Ф. Г.** Исследование износостойкости газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : мате-

риалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апр. 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 124–125.

4. **Борисов, Ю. С.** Плазменные порошковые покрытия / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова. – Киев : Техника, 1986. – 222 с.

Статья сдана в редакцию 30 июня 2016 года

Алексей Сергеевич Федосенко, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
Тел. :+375-295-46-96-34.

Федор Григорьевич Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет

Григорий Федорович Ловшенко, д-р техн. наук, проф., ректор Белорусской государственной академии авиации.

Aleksei Sergeyeovich Fedosenko, senior lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: +375-295-46-96-34.

Fedor Grigoryevich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

Grigory Fedorovich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Rector of Belarusian State Aviation Academy.